



DEPARTAMENTO DE CRISTALOGRAFÍA, MINERALOGÍA Y QUÍMICA  
AGRÍCOLA

TESIS DOCTORAL:

**DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA BMP PARA ENSAYOS DE  
CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS  
AGROALIMENTARIOS CON FANGOS MIXTOS DE EDAR**

Presentada por Carlos Benito Mora para optar al grado de  
doctor por la Universidad de Sevilla

Sevilla, Mayo 2017



**DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA BMP PARA ENSAYOS DE  
CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS  
AGROALIMENTARIOS CON FANGOS MIXTOS DE EDAR**

**El Director**



**D. Julián Lebrato Martínez**

**El Tutor**



**D. Julián Lebrato Martínez**







**Programa de Doctorado Recursos Naturales y Medioambiente  
RD. 99/2011**

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and a final horizontal stroke.

**D. Carlos Benito Mora**



## **Agradecimientos**

---



## **Agradecimientos**

El desarrollo de esta tesis doctoral ha sido un proyecto de varios años de esfuerzo, realizada en el grupo de tratamiento de aguas residuales de la escuela politécnica superior de la universidad de Sevilla.

En primer lugar quiero agradecer a mi director de tesis, D Julián Lebrato Martínez, por toda su dedicación y confianza en mí que ha tenido durante todos estos años guiándome y ayudándome.

Al director, D Fernando Fernández Polanco, por la ayuda profesional y por sus valiosas aportaciones durante estos años.

Al programa de doctorado que he cursado Recursos Naturales y Medioambiente.

A Dolores Garvi, compañera y amiga, por sus consejos, apoyo y ánimo.

A mi amigo Antonio, que se merece muchas y buenas palabras, ya que con él he compartido laboratorio e incontables horas de trabajo, lo cual no tiene precio. Por todas las ideas científicas de las que tanto provecho he sacado.

Finalmente quiero agradecer a mis padres, ya que todo esto no hubiera sido posible sin su sacrificio, a mi hermana por aguantarme, a Marina por ayudarme y escucharme.



## ÍNDICE

---





# ***ÍNDICE DE CONTENIDOS***

<b>1. Introducción</b>	<b>22</b>
1.1. Enfoque de la investigación	22
<b>2. Justificación del trabajo</b>	<b>28</b>
2.1. Hipótesis	32
2.2. Objetivo general	32
<b>3. Fundamentos biológicos de la digestión anaerobia</b>	<b>36</b>
3.1. Microbiología y bioquímica del proceso anaerobio	37
3.1.1. Hidrólisis	39
3.1.2. Acidogénesis	39
3.1.3. Acetogénesis	40
3.1.4. Metanogénesis	42
3.2. Parámetros que influyen en la digestión anaerobia	43
3.2.1. Parámetros de control	44
3.2.2. Parámetros de Operación	49
<b>4. Materiales y Métodos</b>	<b>56</b>
4.1. Residuos	56
4.1.1. Lodo de Depuradora (Fango Mixto)	56
4.1.2. Lixiviado	58
4.1.3. Aguas de Glicerina	59
4.1.4. Lactosuero	61
4.1.5. Residuos industria del olivar (Alperujo y Alpechín)	63
4.1.6. Cascara de arroz	66
4.1.7. Aceite usado de cocina	67
4.2. Microdigestores de una sola etapa	68
4.2.1. Ensayo de Potencial Metanogénico (Biochemical Methane Potential-BMP)	68
4.2.2. Aplicabilidad de los test BMP	71
4.2.3. Objetivos de los test BMP en esta investigación	72
4.2.4. Procedimiento para la realización de los ensayos BMP.	73
4.2.5. Componentes de la mezcla BMP	79
4.2.6. Equipo experimental	82
4.3. Métodos analíticos	91
4.3.1. Determinación del pH (APHA, 4500-H <sup>+</sup> ,2015)	91
4.3.2. Determinación de la conductividad eléctrica (CE) (APHA, 2510, 1992)	92
4.3.3. Sólidos Totales (ST): Sólidos totales fijos (STF) y Sólidos totales Volátiles (STV) (APHA,2540A,1992).	93
4.3.4. Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) (APHA, 5220 C, 2005)	96
4.3.5. Determinación de la Alcalinidad Total y Soluble (APHA, 1992)	99
4.3.6. Determinación de los Ácidos Grasos Volátiles (AGV) (APHA, 1992)	101
4.3.7. Producción de Biogás	103
<b>5. Resultados y discusión</b>	<b>108</b>
5.1. Ensayo de Digestión anaerobia mono-sustrato de residuos orgánicos	110
5.1.1. Ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con Fango Mixto (EDAR Copero)	112
5.1.2. Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Cascara Arroz	120

5.1.3.	Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Suero Bruto	128
5.1.4.	Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Suero Ácido	136
5.1.5.	Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Alperujo	144
5.1.6.	Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Aguas de Glicerina	152
5.1.7.	Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con lixiviado	160
5.1.8.	Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Alpechín	167
5.1.9.	Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Aceite usado de cocina	175
5.1.10.	Comparación de la digestión mono-sustrato de los diferentes residuos orgánicos estudiados.	183
5.1.10.1.	Comparación de la digestión mono-sustrato de los diferentes residuos orgánicos estudiados Fase 1	183
5.1.10.2.	Comparación de la digestión mono-sustrato de los diferentes residuos orgánicos estudiados. Fase 2	185
5.1.10.3.	Comparación de la digestión mono-sustrato de los diferentes residuos orgánicos estudiados. Fase 3	187
5.1.10.4.	Comparación ensayo de digestión mono-sustrato de los diferentes residuos orgánicos estudiados. Fase (1, 2 y 3)	189
5.1.11.	Conclusiones ensayo digestión anaerobia mono-sustrato	192
<b>5.2.</b>	<b>Ensayo de Co-digestión anaerobia de Fango mixto y residuos orgánicos.</b>	<b>193</b>
5.2.1.	Ensayo Co-digestión de Fango Mixto y Cascara de Arroz	195
5.2.2.	Ensayo Co-digestión de Fango Mixto y Suero Bruto	203
5.2.3.	Ensayo Co-digestión de Fango Mixto y Suero Ácido	211
5.2.4.	Ensayo Co-digestión de Fango Mixto y Alperujo	219
5.2.5.	Ensayo Co-digestión de Fango Mixto y Aguas de Glicerina	227
5.2.6.	Ensayo Co-digestión de Fango Mixto y Lixiviado	235
5.2.7.	Ensayo Co-digestión de Fango Mixto y Alpechín	243
5.2.8.	Ensayo Co-digestión de Fango Mixto y Aceite usado de cocina	251
5.2.9.	Comparación de la Co-digestión anaerobia de Fango mixto y residuos orgánicos.	259
5.2.9.1.	Comparación de la Co-digestión anaerobia de Fango mixto y residuos orgánicos. Fase 1	259
5.2.9.2.	Comparación de la Co-digestión anaerobia de Fango mixto y residuos orgánicos. Fase 2	261
5.2.9.3.	Comparación de la Co-digestión anaerobia de Fango mixto y residuos orgánicos. Fase 3	263
5.2.9.4.	Comparación ensayo Co-digestión anaerobia de Fango mixto y residuos orgánicos. Fases (1,2 y 3)	265
5.2.10.	Conclusiones ensayo Co-digestión anaerobia	268
<b>5.3.</b>	<b>Ensayo de Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos</b>	<b>269</b>
5.3.1.	Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos de Cascara Arroz y Lixiviado	270
5.3.2.	Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos de Suero Bruto y Alperujo	278
5.3.3.	Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos de Alperujo y Alpechín	286
5.3.4.	Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos de Aguas de Glicerina y Suero Bruto	294
5.3.5.	Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos de Lixiviado y Suero Bruto	302
5.3.6.	Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos de Aceite usado de cocina y Alperujo	310
5.3.7.	Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos de Aguas de Glicerina y Lixiviado	318

5.3.8.	Comparación de la digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos.	326
5.3.8.1.	Comparación de la digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. Fase 1	326
5.3.8.2.	Comparación de la digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. Fase2	329
5.3.8.3.	Comparación de la digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. Fase 3	332
5.3.8.4.	Comparacion ensayo digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. Fase (1, 2 y 3)	335
5.3.9.	Conclusiones ensayo digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos.	337
<b>5.4.</b>	<b>Ensayo de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica</b>	<b>339</b>
5.4.1.	Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de Cascara Arroz y Lixiviado	341
5.4.2.	Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de Suero B y Alperujo	349
5.4.3.	Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de Alperujo y Alpechín	357
5.4.4.	Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de Aguas de Glicerina y SueroB	366
5.4.5.	Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de Lixiviado y SueroB	376
5.4.6.	Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de Aceite usado de cocina y Alperujo	386
5.4.7.	Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de Aguas de Glicerina y Lixiviado	396
5.4.8.	Comparación ensayo de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica.	405
5.4.8.1.	Comparación ensayo de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica. Fase 1	405
5.4.8.2.	Comparación ensayo de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica. Fase 2	408
5.4.8.3.	Comparación ensayo de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica. Fase 3	411
5.4.8.4.	Comparación ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase (1, 2 y 3)	414
5.4.9.	Conclusiones ensayo de Co-digestión anaerobia de fango mixto de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica.	416
<b>6.</b>	<b>Conclusión</b>	<b>420</b>
<b>7.</b>	<b>Futuras líneas de investigación</b>	<b>426</b>
<b>8.</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>430</b>
<b>Anexo I.</b>	<b>Digestión anaerobia mono-sustrato</b>	<b>440</b>
<b>Anexo II.</b>	<b>Co-digestión anaerobia de Fango mixto y residuos orgánicos</b>	<b>448</b>
<b>Anexo III.</b>	<b>Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos</b>	<b>478</b>
<b>Anexo IV.</b>	<b>Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica</b>	<b>504</b>
<b>Anexo V.</b>	<b>Ilustraciones</b>	<b>534</b>

<b>Anexo VI Tablas</b>	<b>538</b>
<b>Anexo VII Gráficas</b>	<b>546</b>

## **RESUMEN**

---



## Resumen

El desarrollo de nueva, y más estricta legislación en materia de tratamiento de residuos, hace necesaria la utilización y mejora de tecnologías no convencionales que eviten los problemas ambientales asociados a las técnicas de gestión tradicionales, tales como la deposición en vertedero. Los residuos agroindustriales presentan, en la mayoría de los casos, una elevada carga orgánica, provocando impactos ambientales.

La co-digestión anaerobia es una alternativa que presenta amplias posibilidades de aplicación, puesto que se basa en el co-tratamiento de residuos orgánicos del sector agrícola e industrial, que permite tratar de manera individual o conjunta dichos residuos, con la ventaja adicional de reducir su contenido en materia orgánica. Este hecho resulta ventajoso tanto desde el punto de vista de proceso como a nivel económico, por ir acompañado en muchos casos de un incremento en la producción de metano y biogás, cuya combustión no contribuye al efecto invernadero.

El objetivo principal de esta investigación es la optimización del uso de residuos industriales y agroalimentarios en digestión o co-digestión anaerobia con fangos mixtos de EDAR, mediante el desarrollo de la Tecnología BMP (Biochemical Methane Potential). Para la realización de la presente investigación, se han llevado a cabo distintos ensayos a escala de laboratorio, para determinar la biodegradabilidad y la producción de metano a partir de los residuos de forma individual o combinada. La obtención de los datos de producción de metano en función del tiempo ha permitido estudiar la estabilidad que presenta la digestión y co- digestión con residuos orgánicos.

Los resultados obtenidos reflejan la viabilidad de diversos residuos en los procesos de digestión y co-digestión anaerobia. Así mismo, los resultados del estudio indican que el lactosuero enmienda el comportamiento de ciertos residuos difícilmente degradables en co-digestión, siendo el caso de los lixiviados de RSU y las aguas glicerosas. Por otro lado, se ha demostrado que es viable la mezcla de dos residuos de difícil comportamiento en digestión anaerobia, como son el lixiviado y la aguas glicerosas, siendo una vía muy prometedora para gestionar dos residuos de difícil gestión.





# **Capítulo 1**

---

## **Introducción**



# **1. Introducción**

## **1.1. Enfoque de la investigación**

Nuestra sociedad debido al crecimiento progresivo en los sectores de la industria, comercio, transporte, entre otros, se incrementa la demanda de recursos durante los últimos años, entre los que se encuentran los combustibles fósiles y materias primas, provocando una serie de desafíos económico-ambientales tales como el cambio climático, eutrofización de las aguas, así como una escasez de residuos.

En este periodo de crecimiento sostenido, el uso que se ha hecho de los recursos del planeta ha sido el más ineficiente desde el punto de vista de la sostenibilidad. Según un informe de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, 2012) que estudia la relación entre el consumo y el medio ambiente, el consumismo se puede considerar como el principal origen de los problemas medioambientales más significativos.

En el ámbito industrial, la situación económica actual deriva de una industria consumista hasta una industria en la que se premia el ahorro, el aprovechamiento de los recursos y la valorización de los residuos. La generación de residuos es una consecuencia directa de cualquier tipo de actividad desarrollada por el hombre; hace años un gran porcentaje de los residuos eran reutilizados en muy diversos usos, pero hoy en día nos encontramos en una sociedad de consumo en la que se genera gran cantidad y variedad de residuos procedentes de un amplio abanico de actividades. Constituyen uno de los problemas ambientales más graves de las sociedades modernas, en particular de las más avanzadas e industrializadas. Se trata de un problema en aumento que no deja de agravarse debido al creciente volumen generado y, a la estrecha relación de paralelismo entre los niveles de renta y calidad de vida. Esta circunstancia negativa, se agrava por la aún insuficiente concienciación ciudadana en esta materia que dificulta con frecuencia la adopción de la mejor solución posible para determinados residuos.

De acuerdo con las estadísticas de las Naciones Unidas, la población en 2050 superará los 9 mil millones de habitantes. La combinación del efecto del crecimiento de la población y las tendencias de consumo conducen a un mayor consumo de recurso. Esto es, una mayor demanda de energía, agua y nutrientes y, un aumento exponencial de los residuos.

Este aumento de los residuos provoca directamente un incremento de la polución del planeta y por consiguiente, la contaminación del medio ambiente. Por ello, mejorar la eficiencia en la utilización de los recursos y la gestión de los residuos no es solo una necesidad sino un desafío.

Por otro lado, el tratamiento de los residuos exige un coste elevado originándose por tanto, la necesidad de búsqueda de la reducción de costes de su tratamiento, bien por la mejora de técnicas conocidas o, por la aplicación de nuevas tecnologías que resulten no solo eficientes sino económicamente viables.

Por todo lo expuesto, desde un punto de vista práctico, económico, medioambiental y social, resulta de gran interés el concepto de residuo como recurso. Esto es, su valorización tanto agrícola (aplicación al suelo) como energética (como fuente de energía). La Unión Europea ha desarrollado un marco legal con el fin de favorecer las políticas de gestión de residuos con el objetivo de mitigar el impacto de los mismos sobre la salud y el medio ambiente, así como mejorar la eficiencia en el uso de los recursos. Con este acto, se persigue reducir la generación de residuos o, cuando su producción es inevitable, promover su reutilización o su reciclaje, así como su eliminación por una vía segura. Teniendo en cuenta que hoy en día los combustibles fósiles representan aproximadamente el 80% de la energía consumida por la humanidad, la obtención de bioenergía (proveniente de materiales biológicos) es una opción enormemente atractiva.

Un tipo de residuos que presenta oportunidades atractivas de gestión, son los residuos de naturaleza orgánica, tales como los fangos o lodos generados en las EDAR (Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales). La directiva 1999/31/CE, relativa al vertido de residuos ha tenido gran influencia en las estrategias adoptadas en las industrias respecto a la gestión de estos residuos.

La digestión anaerobia es básicamente un cultivo biológico de microorganismos que se alimentan de materia orgánica, asimilándola y dando lugar a una mezcla de gases de gran poder energético, con presencia mayoritaria de metano y CO<sub>2</sub>. A la mezcla de gases producidos durante este proceso se le denomina “biogás” (Terreros-Mecalco, J., Olmos, A. et al; 2009). La digestión anaerobia es una de las tecnologías de producción de bioenergía más eficientes desde el punto de vista energético y, una de las más beneficiosas para el medio ambiente (Fehrenbach et al., 2008; Weiland et al., 2010). En términos de

sostenibilidad, resulta favorable debido a una mejora del balance energético como consecuencia de la generación de biogás.

La alta capacidad calorífica del gas de digestión, aproximadamente  $23000 \text{ kJ/nm}^3$  (Degremont, 2011), es aprovechada en los equipos de cogeneración en las grandes EDAR para producir energía eléctrica y calorífica. Asimismo, existe la posibilidad de inyectar el biogás a la red de distribución de gas natural e incluso de utilizarlo como combustible para vehículos. Aunque la opción más sencilla es emplearlo para abastecer las propias instalaciones de tratamiento. Esto supone un importante ahorro económico, dado que disminuye la energía eléctrica que se debe importar de la red. Por tanto, cualquier mejora en los rendimientos del proceso de digestión anaerobia que conlleven un incremento en la producción de gas, contribuirá a una mayor producción de electricidad y, a un mayor ahorro energético. Esto supone un menor consumo de combustibles fósiles y por tanto, una disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.

Asimismo, gracias a esta tecnología, se obtiene un digestato estabilizado (fangos de depuración) disminuyéndose los requerimientos de espacio para el almacenamiento o, los gastos derivados del transporte abaratando los costes de gestión. La eliminación de fango puede representar hasta el 50% de los costes de operación de una EDAR, por lo que su gestión o tratamiento requiere especial atención (Esteban Gutiérrez, M., et al; 2014).

Investigar esta tecnología es muy positivo para la industria desde el punto de vista económico-ambiental. El objetivo es obtener una mayor eficacia en la transformación de estabilización del lodo y generación de biogás. alguna de las opciones que se barajan en la optimización de la digestión anaerobia es, realizar algún tipo de pretratamiento o, utilizar algún co-sustrato que facilite la digestión, solventando las carencias que puedan tener los sustratos, generándose un efecto de sinergia y cumpliendo con los objetivos marcados. La co-digestión, demuestra ser una alternativa muy a tener en cuenta en cualquier proceso en el que se estuviera utilizando digestión anaerobia, aumentando no solo los rendimientos del proceso, sino también la producción de gas, por lo que se optimiza la gestión de residuos industriales y se disminuyen las emisiones de dióxido de carbono en el país.



## **Capítulo 2**

---

### **Justificación del trabajo**





## 2. Justificación del trabajo

Uno de los principales problemas de la sociedad actual es la generación de grandes volúmenes de residuos, con el consiguiente riesgo para el medio ambiente y la salud pública. Según la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre los residuos se entiende por residuo *“cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse”*.

Actualmente, tal y como recoge la Directiva Marco de Residuos 2008/98/CE, los Estados miembros de la Unión Europea deben apoyar el uso de reciclados, priorizando las actuaciones en consonancia con la jerarquía de prevención, reutilización, reciclado, valorización y eliminación. Así mismo, y con el objetivo de alcanzar una sociedad basada en el reciclado, no se debe fomentar el vertido o la incineración de dichos residuos, siempre que sea posible. Adicionalmente, la Directiva comunitaria relativa al vertido de residuos (1999/31/CE) y la relativa a los residuos (2006/12/CE), establecen la necesidad de reducir y eliminar a medio plazo el vertido de materia orgánica en los vertederos, mediante el empleo de tratamientos que permitan su valorización, siendo simultáneamente respetuosos con el medio ambiente y compatibles con estrategias de separación en origen y reciclaje de la máxima cantidad de materiales que sea posible. Concretamente, la Unión Europea ha marcado el objetivo de reducir la cantidad de residuos depositados en vertedero en un 35 % en 2020 y hasta un 50 % en 2050, respecto al año 2000 (Lundin et al., 2004).

Según el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, que regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, el artículo 5, detalla que la Administración General del Estado y las Comunidades Autónomas deben elaborar un programa conjunto de actuaciones para reducir los residuos biodegradables destinados a vertedero. Éste programa debe incluir medidas que permitan alcanzar los objetivos específicos que para residuos urbanos biodegradables recoge el artículo 5.2 del citado Real Decreto, en particular mediante **reciclaje, compostaje y otras formas de valorización como producción de biogás mediante digestión anaerobia**, donde se establece que deberá alcanzar los siguientes objetivos:

- a) A más tardar el 16 de julio de 2006, la cantidad total (en peso) de residuos urbanos biodegradables destinados a vertedero no superará el 75 por 100 de la cantidad total de residuos urbanos biodegradables generados en 1995.

b) A más tardar el 16 de julio de 2009, la cantidad total (en peso) de residuos urbanos biodegradables destinados a vertedero no superará el 50 por 100 de la cantidad total de residuos urbanos biodegradables generados en 1995.

c) A más tardar el 16 de julio de 2016, la cantidad total (en peso) de residuos urbanos biodegradables destinados a vertedero no superará el 35 por 100 de la cantidad total de residuos urbanos biodegradables generados en 1995.

Otro tipo de residuos que también considera el Plan Nacional de Residuos Urbanos, son los lodos de depuradora cuya producción va en aumento debido al crecimiento en el número de EDARs, consecuencia directa de la puesta en práctica de la Directiva Europea de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (directiva 91/271/CEE), y del aumento en el nivel de tratamiento del agua. Esta directiva fija el nivel de rendimiento de depuración adecuado según las circunstancias (básicamente, las dimensiones del núcleo urbano y la categoría de los puntos de vertido).

La producción de lodos procedentes de EDAR, está planteando serios problemas para su almacenamiento y, sobre todo, para su eliminación. Por otra parte, la composición de estos lodos, les convierte en una fuente de materia orgánica y de elementos fertilizantes, presentando oportunidades atractivas de gestión. Los lodos son tratados en un proceso de digestión anaerobia con el fin de estabilizar, reducir su volumen y mejorar los gastos relacionados a su gestión. Tanto el Plan Nacional de Lodos de Depuradora de Aguas Residuales (2008-2015) como el Plan de Residuos PNIR, recogen entre sus objetivos la valorización energética de los lodos de depuradoras y de los residuos biodegradables.

Actualmente los recursos energéticos convencionales van siendo más escasos, por lo que se hace necesario utilizar las energías renovables de forma tecnológicamente correcta, entre ellas, el biogás, obtenido de la **digestión anaerobia**.

El proceso de generación conjunta de electricidad y calor, representa una oportunidad medioambiental y tecnológicamente atrayente para **aprovechar el biogás obtenido a partir de la digestión de residuos**, creando fuentes energéticas alternativas, dando así un paso importante para reducir el calentamiento global y su efecto invernadero, que provoca cambios climáticos incalculables y a menudo devastadores.

En el PER 2011-2020 existe una declaración de objetivos para la producción de biogás a partir de distintos residuos biodegradables concretos y una serie de propuestas de normativa:

1. Adaptación del marco legal del Régimen Especial, mediante el establecimiento de objetivos específicos y diferenciados para las tecnologías de digestión anaerobia y la de desgasificación de vertederos, la eliminación de la limitación al uso de gas natural, permitiendo hibridaciones en cualquier proporción y la creación de un nuevo umbral de potencia (250 kW) para el biogás procedente de digestores anaerobios (HEL-004).
2. Simplificación de trámites administrativos. Las variadas normativas que afectan a las plantas de biogás agroindustrial hacen que los procesos de obtención de permisos sean complejos, largos y sujetos a una discrecionalidad significativa. La adopción de medidas encaminadas a simplificar y homogeneizar dichos procesos (con especial atención a instalaciones de pequeño tamaño), contribuirá a disminuir las retenciones a desarrollar proyectos de este tipo. Se incluye aquí la reducción de barreras administrativas a proyectos de I+D+i (HEL-011).

En el marco actual de generación de residuos y de explotación de los recursos naturales, la búsqueda de una solución viable para la gestión de los mismos se puede considerar una tarea urgente y prioritaria para determinados sectores.

Concretamente, el sector cuya actividad se centra en el tratamiento de aguas residuales se enfrenta a serios problemas asociados a la gestión de un flujo de residuos: los lodos. No solo es necesario dar con una alternativa adecuada desde el punto de vista económico, sino que es preciso cumplir con la normativa vigente, sin olvidar que la selección de una u otra opción debería basarse preferiblemente en principios de sostenibilidad.

La **co-digestión** es una alternativa, se basa en el co-tratamiento de distintos flujos de residuos orgánicos (dos o más residuos de distinta naturaleza) como co-sustratos en el proceso convencional de digestión anaerobia, un hecho, que habitualmente presenta efectos positivos tanto desde el punto de vista de proceso como a nivel económico. Los beneficios de la co-digestión pueden ser los siguientes:

- Un aumento en el rendimiento metanogénico o en la capacidad de producir metano. En este sentido, en bibliografía existen varios trabajos en los que se ha comprobado que el uso de un co-sustrato (o co-residuo) puede suponer un aumento del rendimiento metanogénico debido a los sinergismos positivos que se

dan en el medio (Mata-Alvarez et al., 2000, Alatríste-Mondragón et al.; 2006; Buendía et al., 2009). Algunos trabajos relativamente recientes demuestran mejoras notables en términos de producción de biogás (Astals et al., 2012) y metano (Alvárez et al., 2010) al mezclar unos determinados residuos.

- Una mejora de la estabilidad del proceso por la complementariedad de los residuos tratados. Por ejemplo, Dai et al. (2013) han comprobado una mejora en cuanto a la estabilidad del digestato gracias a la co-digestión, hecho que atribuyen a que el co-sustrato empleado actúa como agente diluyente para compuestos potencialmente tóxicos ( $\text{NH}_3$  y  $\text{Na}^+$ ). En otro estudio, se analizan los efectos de utilizar estiércol como co-sustrato para el tratamiento de efluentes originados en la elaboración de aceite de oliva (Angelidaki et al., 1997), La principal conclusión de este trabajo es que gracias a que el estiércol posee una importante capacidad tampón y a que contiene varios nutrientes esenciales, es posible tratar los efluentes mencionados sin una dilución previa ni la adición de una fuente externa de alcalinidad y de nitrógeno.
- Posibilidad del tratamiento de residuos cuyo tratamiento no es viable o es problemático si se lleva a cabo de manera aislada. A este respecto, Robra et al. (2010) afirman que la mono-digestión de glicerol crudo de la industria de biodiesel es inviable debido a que carece de nitrógeno para la biomasa, por lo que su co-digestión con residuos que contienen suficiente nitrógeno pero con un bajo contenido energético es una opción prometedora. Estos autores observan mejoras en la producción de metano al suplementar hasta un 15% de glicerol crudo en un digestor de estiércol. Por otro lado, Álvarez & Lidén (2008) demuestran la viabilidad de combinar estiércol, con residuos de matadero, de frutas y verduras.
- Una mejora de la calidad del producto final en cuanto al contenido de nutrientes, que lo hace más atractivo para su aplicación a suelos. Umetsu et al. (2006) afirman que la co-digestión de estiércol vacuno con residuos de industrias de procesamiento de alimentos aumenta el valor fertilizante de producto final.
- Una gestión de los residuos que se le adicionan al digestor.
- Eficiencia energética por un aumento de gas metano y dióxido de carbono (biogás) y por tanto aumento de producción de electricidad si se emplean motores de cogeneración.

Por lo tanto, la alternativa de co-digestión puede resultar beneficiosa en términos de dilución de compuestos potencialmente tóxicos o balance de nutrientes, pero también resulta ventajosa desde el punto de vista de operación por permitir un valor mayor para la carga orgánica máxima aplicable.

## **2.1. Hipótesis**

Las hipótesis de partida del siguiente trabajo según experiencias de estudio anteriores son:

1. Es posible la utilización de residuos orgánicos en digestores de una EDAR.
2. Es posible establecer el estudio de la digestión anaerobia en digestores piloto, mediante la tecnología BMP.
3. Es posible el tratamiento de residuos de difícil gestión, perjudiciales para el medio ambiente, como sustratos o co-sustratos en un proceso de digestión anaerobia.
4. Es posible aprovechar residuos de difícil gestión, perjudiciales para el medio ambiente, generando un incremento o mejorando la producción de biogás, en una digestión y co-digestión anaerobia.
5. Es posible estudiar la complementariedad de residuos inestables con otros sustratos estables o no, de forma que se puedan aprovechar la mayor cantidad de residuos orgánicos agroalimentarios e industriales.

## **2.2. Objetivo general**

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se fija como objetivo general la **optimización del uso de residuos industriales y agroalimentarios en digestión o co-digestión anaerobia con fangos mixtos de EDAR, mediante el desarrollo de la Tecnología BMP** (Biochemical Methane Potencial), este aprovechamiento energético mejora de modo que se cumplen los requisitos energéticos y medio ambientales marcados por la legislación y los planes vigentes en España relativos a:

- Disminución de la cantidad de residuos biodegradables destinados a vertedero.
- Valorización energética de los lodos de depuradora y de los residuos biodegradables.
- Aumento en la generación de energía renovable, en concreto en el área del biogás procedente de digestión anaerobia.
- Disminución del coste Energético



## **Capítulo 3**

---

### **Fundamentos biológicos de la digestión anaerobia**





### **3. Fundamentos biológicos de la digestión anaerobia**

En este apartado se describe la digestión anaerobia y las implicaciones del tratamiento de aguas residuales desde un punto de vista macroscópico y microscópico. Los requerimientos a nivel substrato, los componentes intermediarios extracelulares y los productos, son descritos junto con los mecanismos de digestión.

La digestión anaerobia o biometanización es la degradación biológica, por medio de un sistema complejo de microorganismos, de substratos orgánicos y ocasionalmente inorgánicos, en ausencia de oxígeno. Como consecuencia de la degradación, la materia orgánica es convertida principalmente en metano, dióxido de carbono y biomasa. El nitrógeno no utilizado en el crecimiento, es generalmente liberado como  $\text{NH}_3$ , reducido a amonio y el fósforo permanece bajo la forma de fosfato. Casi el 90% de la energía contenida en la materia orgánica puede ser trasformada en biogás (fuente potencial de la energía eléctrica), un 5-7% usado para el crecimiento celular y un 3-5% se pierde como calor (McInerney et al., 1979). Las reacciones bioquímicas ocurridas en el proceso habitual se pueden clasificar en cuatro etapas: la hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis.

La digestión anaerobia se origina en biotopos muy diferentes. No solo sucede en procesos industriales sino también de forma espontánea en la naturaleza, como sedimentos lacustres y marinos, arrozales, micro-ambiente anóxico del suelo (vertederos sobre todo), el tracto digestivo del hombre y de los animales (rumiantes) y algunas especies de termitas (Moletta, 1993). (Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl de la Universitat de Lleida. Grupo Laboratori d'Enginyeria Ambiental, 2001)

La digestión anaerobia, frente a los procesos aerobios, transcurre con un menor desprendimiento calorífico, lo que determina un mayor contenido energético de los productos resultantes y consecuentemente, un mayor rendimiento energético del proceso. La fracción de la energía total disponible utilizada por los microorganismos para su propio crecimiento, es mucho menor que en los sistemas aerobios. No obstante, junto con la producción de biogás como fuente de energía, la digestión anaerobia ofrece numerosas ventajas frente a los procesos aerobios. No necesita ningún aporte energético para la oxidación de la materia orgánica ya que la producción de fangos biológicos es muy baja ( $0.08\text{-}0.15 \text{ kg SSV. Kg DQO}^{-1}$  frente a  $0.7 \text{ kg SSV kg DQO}^{-1}$  en los aerobios (Aznar y Jimenez, 1993). La digestión anaerobia no sólo transforma parte de la materia orgánica

en un gas combustible, sino que produce una mineralización del residuo, haciendo que compuestos orgánicos se transformen en compuestos minerales. Se produce un desdoblamiento de la materia orgánica en un combustible y nutrientes (N, P, K) de forma natural, conservando la mayor parte de los compuestos minerales.

Además la digestión anaerobia es capaz de tratar efluentes de alta carga orgánica (como pueden ser los de la industria agroalimentaria, química, cervecera, papelera, etc.), con menor requerimiento de nutrientes. Y al tratarse de sistemas cerrados, se reducen las posibles fuentes de mal olor. (Ruiz Cabrera, C. M. 2002).

Sin embargo la digestión anaerobia, es un proceso complejo, difícil de operar en condiciones estables, debido a la sensibilidad, las perturbaciones de las poblaciones microbianas que intervienen en el proceso, y la susceptibilidad a las posibles sobrecargas.

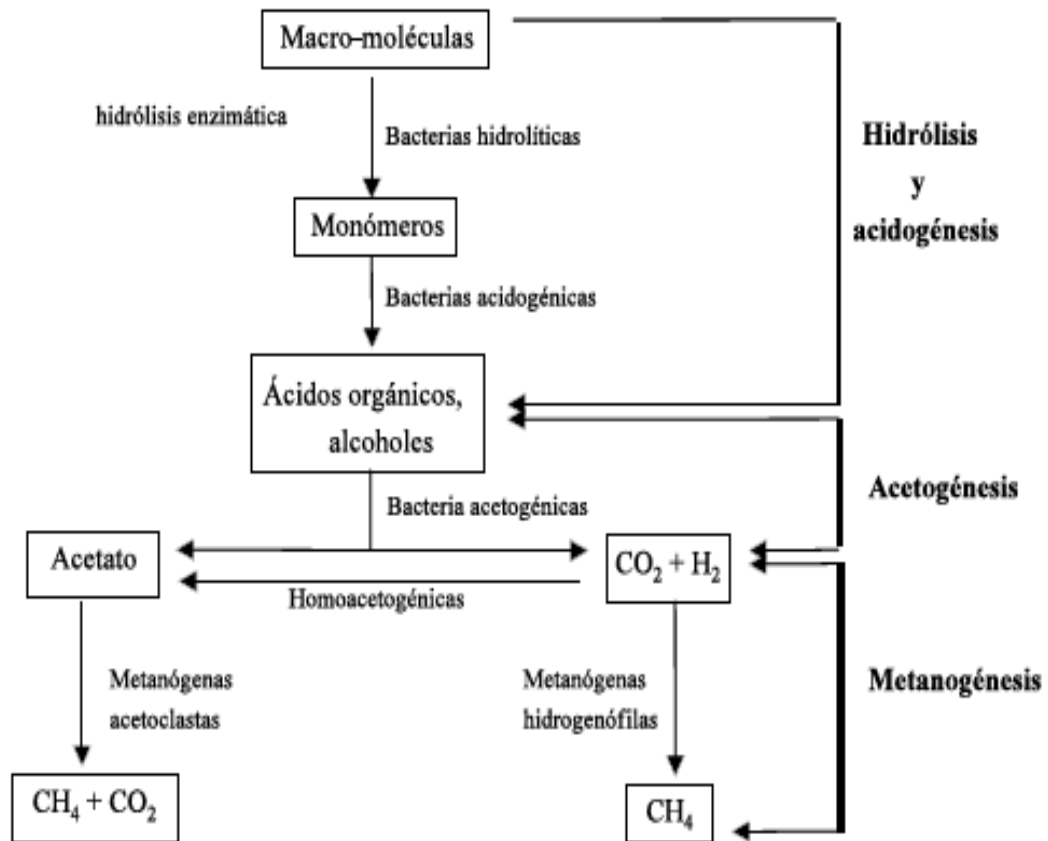
Además de constituir una alternativa a los procesos aerobios convencionales, la digestión anaerobia puede presentarse como una etapa de un proceso global de depuración que combine adecuadamente procesos anaerobios, aerobios y/o químicos.

### **3.1. Microbiología y bioquímica del proceso anaerobio**

El proceso de digestión anaerobia consiste en una cadena secuencial de rutas metabólicas y acciones de los diferentes grupos tróficos de bacterias anaerobias, que participan en la conversión de la materia orgánica compleja en metano y dióxido de carbono. Se estima que existen más de 150 especies, en las que se encuentran anaerobios estrictos (que se inhiben en presencia de concentraciones de oxígenos superiores a  $0.01 \text{ mg.L}^{-1}$ ) y anaerobios facultativos, que son activos tanto en medios aerobios como anaerobios (Torien y Hattingh, 1969). Cada uno lleva a cabo el proceso bioquímico que le aporta el mayor rendimiento energético, compitiendo por los diferentes sustratos disponibles (Soubes, 1994).

Debido a la complejidad del proceso, es esencial que exista una relación equilibrada y coordinada entre los distintos grupos de bacterias presentes. La siguiente figura representa el esquema global del proceso de la digestión anaerobia, agrupando las principales reacciones que se originan. La degradación biológica de la materia orgánica se produce por un mecanismo de cuatro etapas llevado a cabo por distintos grupos de bacterias facultativas y anaerobias estrictas que, de manera secuencial utilizan los productos

metabólicos generados por cada grupo. Involucra tres grandes grupos tróficos y cuatro pasos de transformación: Hidrólisis (Grupo I: Bacterias Hidrolíticas), Acidogénesis (Grupo I: Bacterias fermentativas), Acetogénesis (Grupo II: Bacterias acetogénicas), Metanogénesis (Grupo III: Bacterias metanogénicas). Dicho modelo fue propuesto por Zeikus en 1979 (Zeikus, 1979, 1981).



*Ilustración 1. Principales etapas de la digestión anaerobia. (Metcalf et al., 2003).*

Los compuestos en la biodegradación anaerobia pueden ser reagrupados en sustratos primarios (macromoléculas), los cuales se encuentran en el agua residual, intermediarios y productos. Los sustratos pueden ser aceites y grasas, carbohidratos y proteínas (sustratos particulares) o ácidos grasos de cadena larga, azúcares y aminoácidos (sustratos solubles). Los intermediarios pueden agruparse dentro de un amplio rango de compuestos gaseosos y solubles y, el producto final de estas reacciones es CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> (Lebrato, J; 1990). El metano, producto reducido final y mayoritario en la fermentación, es esencialmente inerte

en ausencia de aceptores de electrones lo que asegura la continuidad de la descomposición de la materia orgánica (Vega Piqueres y col.; 1983).

### **3.1.1. Hidrólisis**

La etapa de hidrólisis constituye el primer paso de la degradación anaerobia. Consiste en la transformación por vía enzimática de los compuestos de alto peso molecular en otros compuestos que puedan servir como fuentes de energía y de carbono celular. Es la conversión de los bio-polímeros (proteínas, carbohidratos y grasas) los cuales no son accesibles en primera instancia, transformándolos en compuestos simples de carácter monomérico (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga, respectivamente). Es llevado a cabo por enzimas extracelulares, secretadas por bacterias hidrolíticas facultativas o estrictamente anaerobias que si solubilizan las partículas y/o sustratos.

La mayoría de los polímeros solubles son fácilmente hidrolizables, sin embargo, cuando los sustratos a hidrolizar son poco solubles o sólidos (desechos de legumbres, compuestos de la industria química, etc.), son tóxicos y/o de difícil biodegradación (complejos ligno-celulósicos, almidón, grasas, etc.) son difícilmente hidrolizables. Debido a esto, la etapa de hidrólisis es considerada como la etapa limitante del proceso para residuos sólidos (Guyot, 1992).

(Appels et al. 2008) y (Hartmann et al. 2000) han estimado que, cerca de 25% de la materia orgánica no es digerida por no estar bio-disponible para las bacterias. Cuando la velocidad de hidrólisis es menor que la velocidad de catabolismo de sus productos, se puede originar una sobreproducción de ácidos y, en consecuencia, una desestabilización profunda del sistema (Soto et al., 1993).

El primer grupo de microorganismos, que se ocupa de la hidrólisis, son las bacterias hidrolíticas. Son bacterias típicas de este grupo las anaerobias estrictas (*Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus* y *Bacillus sp.*) y las facultativas (*Esterichia Coli* y *el Bacillus sp.*) (Lebrato, J.; 1990).

### **3.1.2. Acidogénesis**

En acidogénesis o fermentación, los productos de la hidrólisis son transportados al interior de la célula, donde se transforman los sustratos solubles en ácidos orgánicos

(ácido láctico), ácidos grasos volátiles (ácido acético, propiónico, butírico, valérico,...), alcoholes (glicerol, etanol), hidrógeno y dióxido de carbono, mediante mecanismos de betaoxidación.

Los ácidos grasos son biomoléculas orgánicas de naturaleza lipídica formadas por una larga cadena hidrocarbonada lineal, de número par de átomos de carbono, en cuyo extremo hay un grupo carboxilo. Cada átomo de carbono se une al siguiente y al precedente por medio de un enlace covalente sencillo o doble. Al átomo de su extremo le quedan libres tres enlaces que son ocupados por átomos de hidrógeno ( $\text{H}_3\text{C}-$ ). Los demás átomos tienen libres dos enlaces, que son ocupados igualmente por átomos de hidrógeno (...  $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$  ...).

En general (aunque a veces no), podemos escribir un ácido graso genérico como  $\text{R}-\text{COOH}$ , en donde R es la cadena hidrocarbonada que identifica al ácido en particular. Los ácidos grasos forman parte de los fosfolípidos y glucolípidos, moléculas que constituyen la bicapa lipídica de todas las membranas celulares.

La población de microorganismos acidogénicos representa 90% de la población bacteriana total de los digestores anaerobios, presentando reducidos tiempos de degradación; por lo que esta etapa nunca será limitante del proceso. En esta fase, el hidrógeno tiene un papel preponderante en la distribución de los productos del proceso. En ella se verifica la disminución del pH del medio por la liberación de protones. Cuando la presión parcial del hidrógeno es inferior a  $10^{-4}$  atm se forma, mayoritariamente, acetato e hidrógeno; siendo este proceso metabólico más rentable en términos energéticos.

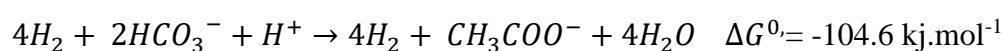
El grupo responsable de la acidogénesis está formado por bacterias facultativas y anaerobias estrictas, “bacterias formadoras de ácidos”, entre las que se han podido aislar están: *Clostridium spp*, *Peptococcus anaerobus*, *Bifidobacterium spp*, *Desulphovibrio spp*, *Corynebacterium spp*, *Lactobacillus*, *Acetomyces*, *Staphylococcus* y *Escherichia Coli* (Lebrato, J.; 1990).

### 3.1.3. Acetogénesis

En esta etapa los intermediarios metabólicos de fermentación (sobre todo los ácidos los ácidos propiónicos, butírico y el etanol) son transformados en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono. Esta transformación, representa la actividad de tres grupos de microorganismos: las bacterias homoacetogénicas, las sintróficas u OHPA (del inglés

*Obligate Hydrogen Producing Acetogen*) y las sulforeductoras. La mayoría de ellas son anaerobias estrictas. Así se pueden encontrar homoacetogénicas como *Clostridium*, *Acetobacterium*, *Sporomusa*, *Acetogenium*, *Acetoanaerobicum*, *Pelobacter*, *Eubacterium*,... (Archer y Kirsop, 1990) sintróficas como *Syntrophobacter*, *Syntrophomonas*, *Syntrophus*... (Dolphin, 1988) y sulforeductoras como *Desulfovibrio*, *Desulfobacter*, *Desulfotomaculum*, *Desulfomonas* (Widdel, 1988).

Las bacterias homoacetogénicas producen acetato únicamente a partir de una mezcla de hidrógeno-dióxido de carbono y algunos, un amplio espectro de compuestos multi o monocarbonados según la siguiente reacción.



Las bacterias OHPA oxidan los productos de la fermentación en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono. Estas bacterias son anaerobias estrictas y dependen para su crecimiento de la eliminación del hidrógeno presente en el medio, ya que cuando la presión parcial de hidrógeno exceden de  $10^{-2}$  atmósferas para el etanol,  $10^{-3}$  para el propionato y  $10^{-4}$  para el butirato, la reacción de oxidación se hace termodinámicamente imposible (Guyot, 1990, 1992). La eliminación de hidrógeno del medio es llevada a cabo, por lo general, por bacterias metanógenas y hidrogenofílicas, aunque en presencia de sulfatos, las bacterias sulfo-reductoras son capaces de establecer una relación sintrófica con las bacterias OPHA. La relación sintrófica recibe el nombre de transferencia interespecífica de hidrógeno y permite llevar a cabo las reacciones, con un balance energético favorable (Cadi, 1994).

Las principales especies del grupo OHPA son *Syntrophobacter wolinii*, *Syntrophomonas savoporans*, *Syntrophomonas wolfei*, *Syntrophospora bryantii*, *Syntrophus buswellii* y *Desulfovibrio* (Lebrato, J.; 1990).

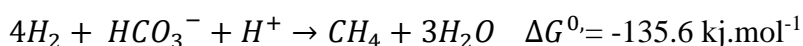
Dentro del grupo de los acetógenos existe un grupo de bacterias conocidas como “bacterias homoacetogénicas” que son anaerobias obligadas y utilizan el CO<sub>2</sub> como aceptor final de electrones, produciendo acetato como producto único de la fermentación anaerobia. Aunque éste no es un grupo taxonómicamente definido, en él se incluyen gran variedad de bacterias Gram (+) y Gram (-) formadoras de esporas como *Clostridium aceticum*, *Clostridium formicoacetum* y *Acetobacterium woodii*.

Dado que los productos del metabolismo de las bacterias formadoras de ácido y acetogénicas están muy poco degradados en relación con los productos de partida, la reducción de DBO<sub>5</sub> o DQO en esta etapa es pequeña.

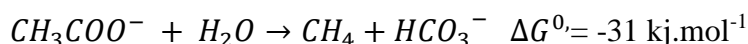
### 3.1.4. Metanogénesis

La metanogénesis es llevada a cabo por un grupo particular de microorganismos productores de metano, representados por 83 especies (García et al., 2000): las arqueobacterias. Éstas, presentan una línea divergente en la evolución con respecto a las bacterias y a los eucariotas, por lo que tienen características específicas, una bioquímica única (en contraste con los sistemas enzimáticos idénticos para el resto de las especies), sobre todo a nivel de sus coenzimas (Ferry, 1992). Todas son anaerobias estrictas y su tasa de crecimiento es menor que del resto de microorganismos implicados en la digestión.

Las arqueobacterias metanógenas pueden utilizar sólo un número restringido de sustratos, principalmente acetato, hidrógeno y dióxido de carbono. Pueden clasificarse, según el sustrato que utilizan en dos grupos: hidrogenofílicas y acetoclásticas. Las metanógenas hidrogenofílicas como *Methanobacterium*, *Methanococcus* y *Methanobrevibacter*, utilizan el hidrógeno y el dióxido de carbono, permitiendo disminuir la presión parcial de hidrógeno (Ferry, 1992), y producen aproximadamente un 30% del metano.



Las acetoclásticas producen el 70 % restante a partir de acetato (McCarty, 1981; McInerney et al., 1979; Moletta, 1993). Se encuentran reagrupadas en sólo 9 especies y los géneros *Methanosaeta* (*Methanotrix*) y *Methanosarcina*, son los más frecuentemente encontrados en un digestor (Morgan et al., 1991). Por lo general, los dos géneros compiten por el sustrato. Noike y sus colaboradores (Noike et al., 1985), observaron una transición en el género dominante dependiendo del tiempo de residencia celular (TRC) aplicado. De esta forma, para un TRC > 9.6 días *Methanosaeta* domina, mientras que para un TRC < 6.5 días los autores constataron la predominancia de *Methanosarcina*.



La metanización es un proceso biológico complejo que necesita ciertas condiciones físico-químicas para optimizar la reacción biológica. Todos los organismos incluidos en este grupo, son anaerobios estrictos y precisan para crecer un potencial de óxido-reducción muy bajo, comprendidos entre -300 y -450 mV (Stronach et al., 1986). La metanización de la materia orgánica puede llevarse a cabo en condiciones psicrófilas (6 a 15°C), mesófilas (25 a 40°C) y termófilas (más de 45°C), no obstante, la digestión se realiza generalmente en régimen mesófilo o termófila, lo que implica un sistema de regulación de la temperatura.

La mayor parte de los microorganismos implicados en la digestión se desarrollan en una gama de pH que varía entre 6 y 8, con un óptimo para los productores de metano entre 6.5 y 7.2. A un pH de 6.2 en el medio las condiciones ácidas presentan una aguda toxicidad para las arqueobacterias metanógenas. Necesitan ciertos oligoelementos para su crecimiento como son el hierro, cobalto, selenio y níquel, constituyentes de coenzimas y de proteínas implicadas en su metabolismo (Soubes, 1994). El magnesio es esencial ya que participa en la reacción final de síntesis de metano, así como el sodio que interviene en el proceso quimiosmótico de la síntesis del ATP.

La presión parcial de hidrógeno debe permanecer inferior a  $10^{-4}$  bares para no inhibir la metanogénesis. La acumulación de hidrógeno en el medio es característica de un desacople de fases o malfuncionamiento de la digestión, frecuentemente, tras una sobrecarga de materia orgánica. Ésta, provocará una acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), concretamente de acetato, propiónico y butírico, de los cuales el propiónico es el más difícil de degradar y se considera un fuerte inhibidor (Ahrling et al., 1995; Möschel y Jördening, 1999).

Los principales géneros de microorganismos que se han identificado incluyen bastoncillos (*Methanobacterium*, *Methanobacillus*), esferas (*Methanococcus*), agrupaciones de esferas (*Methanosarcina*) y las *Methanotrix*, filamentosas que ayudan a la floculación y formación de biopelículas (Lebrato, J.; 1990).

### **3.2. Parámetros que influyen en la digestión anaerobia**

Como todo proceso biológico, la digestión anaerobia se efectuará satisfactoriamente o no dependiendo de las condiciones que estén presentes en el medio. Para posibilitar el adecuado desarrollo de los microorganismos puedan degradar la biomasa, bien relativos



a la alimentación, o bien a las condiciones de operación en el interior del reactor, es de gran importancia controlar los parámetros de operación, de modo que se logre operar en condiciones favorables para los microorganismos, y así alcanzar rendimientos óptimos de depuración.

Seguidamente se explican algunos de los diferentes parámetros físicos y químicos presentes en los procesos anaerobios; siendo los factores principales que influyen en el proceso.

### **3.2.1. Parámetros de control**

En el proceso de digestión anaerobia existen numerosos parámetros medibles, no todos proporcionan la fiabilidad necesaria ni permiten anticiparse con el tiempo suficiente para evitar periodos de inestabilidad. Por lo tanto, se han utilizado una serie de parámetros como indicadores de la evolución del proceso.

#### **3.2.1.1. Biogás**

Es uno de los parámetros más monitorizados en procesos anaerobios. Se considera un buen indicador del funcionamiento global del proceso y no resulta útil para predecir periodos de inestabilidad con la suficiente anticipación. Sin embargo, la composición del biogás se puede considerar un indicador más útil, en especial la proporción relativa de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ . A este respecto, hay que tener en cuenta que ésta se puede ver afectada por factores intrínsecos del proceso como; cambios en la proporción de lípidos, carbohidratos y proteínas del residuo tratado. En términos generales, un porcentaje de metano igual o superior al 60% se puede interpretar como indicativo de estabilidad. La determinación de la concentración de metano se puede llevar a cabo por diferentes técnicas como la cromatografía de gases, sensores específicos para metano o baños de hidróxido sódico.

#### **3.2.1.2. pH y capacidad buffer**

El pH es uno de los factores que condicionan la evolución de los tratamientos anaerobios en mayor medida a causa de su efecto sobre la actividad microbiana. Sin embargo, no todos los grupos de microorganismos anaerobios muestran el mismo grado de sensibilidad frente al pH. En concreto, las especies metanogénicas presentan una actividad óptima que se da en general en torno a un pH de 7 mientras que, por el contrario,

la actividad de las especies acidogénicas es óptima en un pH cercano a 6. Cuando el pH de un digestor en condiciones de equilibrio comienza a disminuir por debajo de un valor de 6,5 la actividad de los microorganismos metanogénicos se ve reducida y, si el descenso de dicho parámetro se mantiene aproximadamente en un pH menor a 5,5, cesa completamente. En estas condiciones, el pH puede seguir disminuyendo hasta un valor de 4,5, en el que la actividad del resto de microorganismos implicados se detiene (Soubes, 1994). En términos generales, el rango más conveniente para evitar inhibiciones es de 6,5-8,5.

Se trata de un parámetro ampliamente utilizado ya que su medida resulta relativamente sencilla y rápida en comparación con otros parámetros. Sin embargo, en determinadas condiciones presenta una baja respuesta y no resulta un indicador efectivo, como es el caso de digestores con alta capacidad amortiguadora (Björnsson et al., 2000).

Por último, hay que tener en cuenta que el pH es uno de los factores que determina la toxicidad de determinados compuestos ( $\text{NH}_3$ , AGV), debido a que influye directamente en la distribución de los mismos en su forma ionizada y no ionizada. La difusión a través de una membrana celular de una molécula sin carga eléctrica es posible, mientras que la de una molécula cargada es poco probable. De este modo, la abundancia de las formas no-ionizadas propicia su entrada en las células, cuyo metabolismo, en consecuencia, se puede ver afectado por varios fenómenos que incluyen cambios en el pH intracelular o la alteración de actividades enzimáticas.

En medios acuosos se usan el  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  como principal sistema buffer, que tiene como principal función neutralizar posibles cambios en el pH del medio.

### **3.2.1.3. Alcalinidad**

Con respecto a la alcalinidad, es un factor importante para la digestión anaerobia ya que, determina la capacidad de un sistema para prevenir cambios rápidos en el pH gracias al efecto tampón de diferentes especies químicas. La especie con capacidad tampón más importante es el bicarbonato.

La alcalinidad parcial (AP) (medida a pH 5,75) depende mayormente de la concentración de bicarbonato y se considera un parámetro de seguimiento de proceso útil (Jantsch & Mattiasson, 2004; Björnsson et al., 2000); en oposición al valor de alcalinidad total que, a pesar de haberse utilizado, se considera un indicador poco sensible de la estabilidad del proceso. En principio, una alcalinidad elevada supone una mayor estabilidad y más robustez ya que permite resistir con mayor eficacia los cambios repentinos del pH. Habitualmente, en la fase inicial del arranque de un digestor anaerobio la producción de ácidos volátiles provoca un descenso del pH pero, a medida que las especies metanogénicas convierten esos compuestos en  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , tanto el pH como la alcalinidad del sistema aumentan. Un descenso en la alcalinidad puede deberse a diferentes causas como, una acumulación de ácidos orgánicos debida a la reducción de la actividad de las especies metanógenas por presencia de agentes tóxicos o, debida a una sobrecarga orgánica (Esteban Gutiérrez, M., et al; 2014).

#### **3.2.1.4. Ácidos Grasos Volátiles (AGV)**

Los AGV son compuestos de carácter ácido que pueden llegar a alterar notablemente las condiciones ácido-base de un sistema anaerobio, por lo que su control de forma periódica en el laboratorio es clave para anticiparnos a posibles fallos en el proceso.

Del mismo modo, estos compuestos son indicadores del balance entre los dos principales grupos microbianos de la biometanización; las bacterias acetogénicas y los organismos metanogénicos, por lo que son considerados los parámetros de control más adecuados.

En cuanto al registro de este parámetro on-line, cabe destacar que se han dado importantes avances en los últimos años tanto para el análisis de su concentración total empleando espectroscopía de infrarrojos, como para su medida individual por técnicas cromatográficas (Pind et al., 2003a; Jacobi et al., 2011, Steyer et al., 2002). Sin embargo, las técnicas de cromatografía son costosas y su aplicación como medida on-line resulta considerablemente compleja en comparación con las técnicas existentes para otros parámetros, y por tanto, se suele utilizar técnicas más sencillas como valoraciones e indicadores. El ratio AGV/alcalinidad es otro de los parámetros importantes para el seguimiento y posible indicador de la estabilidad del proceso (Ruiz Cabrera, C. M. 2002).

### **3.2.1.5. Relación Carbono/Nitrógeno**

El rango de 25-30, es considerado como óptimo para la digestión anaerobia. Una relación C/N elevada puede provocar la limitación de nitrógeno, compuesto necesario para el crecimiento de las bacterias. De otra forma, relaciones bajas pueden provocar la inhibición de las bacterias por elevadas concentraciones de amonio.

### **3.2.1.6. Sólidos**

En cuanto a la influencia que tienen los sólidos en el proceso de digestión, un aumento de la media de sólidos en suspensión del efluente puede significar un aumento lento de la presencia de AGV, una disminución en la producción de gas y un lavado de bacterias que salen del reactor con la corriente de salida (Ocaña Perez-Cerdá. Fco. J. 2011).

### **3.2.1.7. Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que representa indirectamente el contenido de materia orgánica de un residuo a través del oxígeno necesario para oxidar químicamente dicha materia orgánica. La carga orgánica introducida en un digestor es la cantidad máxima asimilable que tiene el digestor, medido en kg DBO o SV / m<sup>3</sup> de digestor (Ocaña Perez-Cerdá. Fco. J. 2011).

Un aumento de la carga con materia orgánica disuelta puede influenciar en el proceso de digestión. Las tres etapas principales del proceso pueden desequilibrarse aumentando la presencia de AGV junto con la producción de gas, y reduciendo el pH rápidamente.

### **3.2.1.8. Inhibidores**

Existen una gran variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos cuya presencia puede llegar a ser tóxicos. Dependiendo de su naturaleza o de su concentración, estos pueden causar efectos reversibles o irreversibles. En ocasiones, se puede ver afectado en cierta medida el rendimiento del proceso o, en el peor de los casos, puede llegar a desestabilizarse por completo. En bibliografía no existe consenso acerca de los valores umbral por encima de los cuales las sustancias con potencial tóxico provocan efectos

inhibitorios. Las causas de esta falta de consenso se pueden atribuir; por un lado, al hecho de que la capacidad inhibitoria depende no sólo de la concentración del compuesto en sí, sino también de otros factores (temperatura, presencia de otras sustancias, etc.) y, por otro lado, a la capacidad de adaptación o aclimatación de la biomasa anaerobia.

El nitrógeno amoniacal ha sido ampliamente estudiado como agente inhibitorio de procesos anaerobios (Angelidaki et al., 1993). Este es principalmente el producto de la degradación de proteínas y urea. La distribución del nitrógeno amoniacal en forma de amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) o amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) varía de acuerdo a las condiciones de pH y temperatura del reactor. No obstante, hay que tener en cuenta que para sostener la actividad metabólica de los microorganismos que intervienen en el proceso es necesaria cierta cantidad de nitrógeno, ya que se trata de un nutriente esencial para los mismos (Calli et al., 2005). Otro compuesto que puede resultar problemático durante la operación de digestores anaerobios es el sulfato, el efecto negativo de este compuesto se puede dar por dos mecanismos distintos: la competición de las especies sulfatorreductoras con otros microorganismos del proceso y, la toxicidad provocada por el sulfuro de hidrógeno resultante de la reducción de los sulfatos. Asimismo, algunos cationes como el sodio o el potasio pueden resultar tóxicos si se presentan en concentraciones elevadas, a pesar de ser necesarios para el crecimiento de la biomasa. Esta afirmación es igualmente válida para algunos metales pesados (Cu, Zn, Cr, etc.), puesto que en concentraciones traza son necesarios para sostener la actividad de numerosas enzimas o co-enzimas, pero pueden resultar tóxicos por encima de determinados niveles (Angelidaki et al., 1997).

Por último, los ácidos grasos de cadena larga producidos en la degradación de grasas y lípidos son sustancias cuyo potencial tóxico se ha investigado en contadas ocasiones. En concreto, el mecanismo principal propuesto para explicar el efecto tóxico de estas sustancias es un fenómeno de adsorción en la membrana o pared celular, creando una barrera física que impide la transferencia de sustratos y metabolitos (Pereira et al., 2005; Neves et al., 2008), por lo que interfiere en mecanismos de transporte u otras funciones celulares (Appels et al., 2008).

Asimismo, la formación de la capa lipídica en la superficie de las células se ha asociado a problemas de flotación y lavado de la biomasa. Numerosos estudios apuntan a un efecto tóxico de los ácidos grasos de cadena larga sobre los microorganismos acetogénicos y

metanogénicos, de los cuales los organismos acetoclásticos parecen verse más afectados (Pereira et al., 2010).

La toxicidad de cualquiera de éstos dependerá fundamentalmente de la concentración en que ellos se encuentran en el residual. En los últimos años, se han venido operando diversos digestores de forma satisfactoria a escala experimental con concentraciones de metales pesados, fenoles y otros compuestos (inhibidores). La adicción de estos compuestos ha supuesto la búsqueda de nuevas herramientas como la preparación de un inóculo apropiado, la aclimatación del digestor a estos compuestos y la búsqueda de aditivos o de efectos sinérgicos que disminuyan los efectos de esta toxicidad. Sin embargo, algunos de estos compuestos tales como níquel, cobalto, molibdeno y selenio, resultan estimulantes para los microorganismos metanógenos, aumentando significativamente la producción de éstos. En estudios realizados en Cuba con residuales de destilería se obtuvieron eficiencias mayores, entre un 25 y 50 % cuando se adicionó al reactor anaerobio un desecho industrial que contenía níquel y cobalto en cantidades trazas.

#### **3.2.1.9. Tipo de Residuo**

Las características y la composición de los residuos tratados por digestión anaerobia afectan significativamente a la evolución del proceso tanto a nivel de arranque, como en términos de tiempo de retención, de producción de biogás o de eliminación de SV (Sólidos Volátiles). Del mismo modo, el tipo de residuo puede condicionar en gran medida la viabilidad del proceso, especialmente en el caso de residuos que poseen o cuya degradación produce compuestos con potencial tóxico para los microorganismos anaerobios, especialmente para los metanógenos. Por otro lado, hay que tener en cuenta que los distintos residuos orgánicos poseen una composición distinta; es decir, diferentes proporciones de moléculas orgánicas (grasas, proteínas, etc.).

#### **3.2.2. Parámetros de Operación**

Hay diferentes formas de operar un digestor anaerobio ya que se pueden seguir diferentes pautas. Asimismo, es preciso tener en cuenta que la selección de una pauta de operación

depende en gran medida tanto de las características del residuo a tratar, como de la tecnología a utilizar para su transformación bajo condiciones anaerobias.

### **3.2.2.1. Temperatura**

Este parámetro influye de manera decisiva en el proceso anaerobio, ya que de él depende mucho las velocidades de reacción con las que se lleva a cabo cualquier proceso biológico, la composición del biogás debido a la dependencia de la solubilidad de los diferentes gases con la temperatura y el daño que pueda causar a los microorganismos presentes en el medio después de ciertos valores de ésta.

Habitualmente, se han descrito tres rangos o zonas de temperatura en los que se da la actividad anaerobia: el rango psicrófilo (5-25°C), el rango mesófilo (20-40°C) y el rango termófilo (50-70°C). No obstante, se ha descrito un cuarto rango; el rango hipertermófilo, que supone temperaturas superiores a los 65-70°C. Si bien es cierto que, las diferentes poblaciones implicadas en el proceso son dependientes de las condiciones de temperatura, los microorganismos metanogénicos son extremadamente sensibles a los cambios de este parámetro y presentan unos intervalos óptimos considerablemente reducidos.

Asimismo, las fluctuaciones en la temperatura bien durante la operación de arranque de un digestor anaerobio o bien, en alguna otra fase del proceso, pueden causar desequilibrios. Por ello, para operar un digestor adecuadamente, es crucial mantener la temperatura en un valor adecuado evitando preferiblemente variaciones superiores a 2-3°C para las bacterias mesófilas y <1°C para las termófilas.

En determinados casos, el uso del rango termofílico puede resultar ventajoso en comparación con el rango mesofílico, ya que se ha comprobado que implica tanto mayores velocidades de reacción, como mayores producciones de biogás, además de mejorar la destrucción de patógenos. Sin embargo, puesto que las bacterias termófilas resultan más sensibles a determinados agentes tóxicos, así como a fluctuaciones en la temperatura fuera del rango óptimo, la operación de un proceso termófilo es habitualmente más complicado.

Cuando se trabaja a temperatura ambiente pueden producirse serias afectaciones en la producción de biogás, ya que en estas condiciones de operación en ocasiones, tienen lugar bastantes fluctuaciones en este parámetro lo que daña el estado fisiológico de los microorganismos presentes en el proceso.

### **3.2.2.2. Carga Orgánica**

Con respecto al modo de operar un digestor anaerobio, otro de los puntos a tener en cuenta es la alimentación aplicada; es decir, la carga orgánica con la que se trabaja. Concretamente, se trata de la Carga Orgánica Volumétrica (COV), aunque es más habitual el uso de la terminología inglesa (OLR: Organic Loading Rate). Este parámetro expresa la cantidad de residuo alimentado diariamente y se puede expresar tanto en kilogramos de sólidos volátiles ( $\text{kg SV (m}^3\cdot\text{d)}^{-1}$ ) como en términos de DQO ( $\text{kg DQO (m}^3\cdot\text{d)}^{-1}$ ), respectivamente.

Resulta especialmente útil en plantas reales, plantas de menor escala operadas en modo continuo o plantas con una pauta de alimentación intermitente (modo semi-continuo). No obstante, en el caso de procesos en los que se hace una única carga inicial (modo discontinuo o batch), la carga orgánica se debería calcular en función del tiempo de operación total empleado. Del mismo modo que los procesos de digestión anaerobia, se pueden realizar con diferentes concentraciones de materia seca. Es posible operar un reactor empleando diferentes valores de OLR. La OLR seleccionada para operar un digestor dependerá no solo del diseño del reactor o del tipo de tecnología empleada, sino también de las características del residuo a tratar. De esta forma, en general, los reactores diseñados para procesos de digestión anaerobia seca admiten mayores cargas que los sistemas húmedos convencionales, en los que se trabaja con valores de OLR en el rango  $1\text{-}4 \text{ kg SV (m}^3\cdot\text{d)}^{-1}$ .

Una de las principales razones por las que no suele ser posible utilizar una elevada OLR, es la inhibición provocada por los AGV al aplicar una carga demasiado elevada. Sin embargo, en la digestión anaerobia seca, al haber un contenido de humedad menor, la velocidad de hidrólisis se ve más limitada y se ralentiza el transporte de AGV de la zona acidogénica a la metanogénica, ya que éste ocurre a través de la fase líquida (Ahrling et



al., 1995). Por lo tanto, un contenido de materia seca elevado permite operar el reactor con OLR mayores, que habitualmente se sitúan en torno a 7-15 kg SV (m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>.

### **3.2.2.3. Agitación**

La agitación beneficia la distribución de la biomasa en el bioreactor. Tanto el tipo de sistema de agitación empleado como la intensidad con que se realiza la agitación condicionan en cierta medida la evolución del proceso, como han comprobado diferentes autores. En concreto, algunos de ellos relacionan el efecto negativo de una agitación excesiva con una insuficiente proximidad entre las distintas especies microbianas que dificulta el intercambio interespecífico de hidrógeno, tan importante para el sintrofismo característico de los procesos anaerobios (Speece et al., 2006; Stroot et al., 2001; Kim et al., 2002; Vavilin et al., 2005).

El sistema debe estar bien agitado y con una cierta intensidad para asegurar condiciones uniformes de parámetros tan importantes como la temperatura, el pH y la concentración de sustrato. No obstante, diversos estudios en ASBR indicaron que la agitación intensa podía fragilizar los flóculos bacterianos y dar como resultado un empobrecimiento del rendimiento del sistema (Dague et al., 1992).

### **3.2.2.4. Tiempo de Retención**

Este parámetro afecta a la eficiencia del digestor con respecto a la eliminación de materia orgánica y la producción específica de biogás y metano. Se refiere al tiempo medio que los sólidos (SRT) permanecen en el reactor. Estos tiempos suelen variar entre 20-30 días dependiendo del tipo de materia orgánica a degradar. Generalmente elevados tiempos de retención originan además de una mayor acumulación de biogás, una reducción más eficaz de los sólidos totales en el reactor, resultando como inconveniente un mayor volumen requerido del reactor.

En procesos tales como los de digestión anaerobia de residuos orgánicos, o en los digestores típicos de fango de mezcla completa, en que el contenido en materia seca del reactor es elevado, ambos parámetros son iguales ya que existe una única fase en el reactor. En consecuencia, parte de la biomasa anaerobia es eliminada al retirar el residuo tratado. En este caso concreto, el TRH y el TRS adquieren el mismo valor por lo que es

más conveniente utilizar el término Tiempo de Retención (TR) (Esteban Gutiérrez, M. 2014).

## **Capítulo 4**

---

### **Material y Métodos**



## 4. Materiales y Métodos

Para llevar a cabo el estudio y confirmación de las hipótesis establecidas, en este capítulo, se realiza una explicación detallada del material empleado en los ensayos experimentales, incluyendo una descripción de los diferentes equipos y reactores utilizados, así como el procedimiento seguido en las medidas analíticas de laboratorio.

### 4.1. Residuos

Los residuos objeto de estudio de esta Tesis Doctoral son residuos generados en distintas industrias y zonas de Andalucía. Se ha seleccionado residuos procedentes de la industria alimentaria, industrial, urbana y agrícola. La mayoría de ellos tienen una difícil gestión y su reutilización o valorización no es óptima.

Los residuos seleccionados para el desarrollo experimental de la tesis fueron:

#### 4.1.1. Lodo de Depuradora (Fango Mixto)

Está formado por los lodos generados durante la depuración de las aguas residuales. El fango mixto es una mezcla de fangos provenientes de la decantación primaria y secundaria. Generalmente se tratan mediante la digestión anaerobia en la propia depuradora y, tras una etapa de deshidratación o secado, se convierten en un residuo a evacuar de la EDAR.



*Ilustración 2. Fango Mixto utilizado en la investigación*

La decantación primaria es la etapa en la cual se separa la mayor parte de los sólidos sedimentables y el material flotante (quedándose en la superficie), que no pudieron ser eliminados en procesos anteriores. Puede emplearse un tratamiento físico-químico que actúe como floculante, favoreciendo la unión de las partículas y su retirada. Tras esta decantación, se aplica generalmente un tratamiento biológico donde la materia orgánica presente es degradada por acción de una serie de microorganismos, denominado fango biológico. Por último, el agua es llevada hasta una decantación secundaria para separar el fango biológico del agua depurada, que se trata en un tratamiento terciario para afinar sus características con el fin de reutilizarla. Los fangos de desecho del proceso son tratados y acondicionados para su posterior utilización o depósito en vertedero (EDAR Copero, 2016)

### EDAR EL COPERÓ

El fango proviene de los reactores anaerobios de la EDAR que trata las aguas residuales urbanas de la cuenca sur de Sevilla (Dos Hermanas y el polígono industrial La Isla). Ésta, tiene una capacidad actual de tratamiento de 255.000 m<sup>3</sup>/día. Su capacidad de diseño es para una población total de 950.000 habitantes equivalentes.



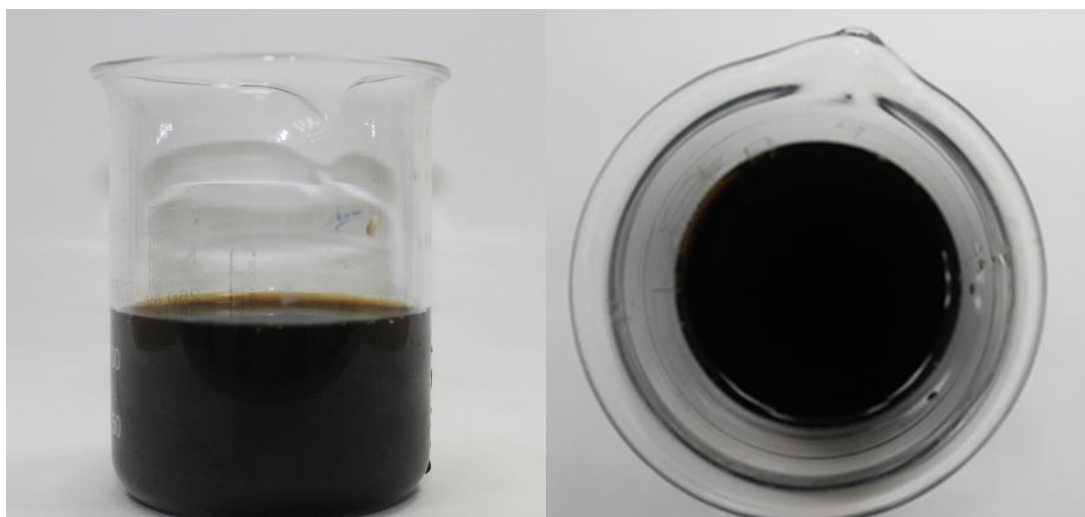
*Ilustración 3. Estación Depuradora de Aguas Residuales "Copero"*

La planta se ha desarrollado en tres fases. La primera de ellas, origen de la EDAR, se puso en servicio en 1987 y consistía en un tratamiento primario con su correspondiente línea de fangos con digestión anaerobia. Fue ampliada con los mismos procesos en 1993 y, finalmente, en el año 2001, se puso en marcha el tratamiento secundario con ampliación

de la línea de fangos. Desde 2003, cuenta con el aprovechamiento energético del gas producido, con una potencia de cogeneración de 4 x 630 (kW/h). En sus terrenos se encuentra una planta solar fotovoltaica de 1 MW de potencia nominal.

#### **4.1.2. Lixiviado**

La generación mundial de residuos sólidos municipales es del orden de dos mil millones de toneladas por año, estimándose un aumento a tres mil millones en 2025 (Charles et al., 2009). El tratamiento de estos residuos consiste en su disposición bajo tierra o en vertederos controlados. De esta manera, el residuo queda aislado del exterior y se degrada de forma constante alejado de la población evitando cualquier tipo de peligro. La dificultad en los vertederos es el control del agua (drenaje superficial, lluvia y aguas subterráneas). Cuando el agua se filtra a través de los residuos en descomposición, extrae los componentes inorgánicos y orgánicos, que produce lixiviados contaminantes que pueden constituir un importante riesgo potencial para el ecosistema circundante y las poblaciones humanas (Pastor, J. 2002). La composición química de los lixiviados varía mucho según la antigüedad del vertedero.



*Ilustración 4. Lixiviado, Complejo Ambiental La Vega*

### MANCOMUNIDAD DE LA VEGA.

El lixiviado utilizado en la presente tesis, proviene del Vertedero de residuos no peligrosos "Complejo Ambiental La Vega" de la Mancomunidad de Servicios de La Vega.

La Mancomunidad de Servicios La Vega es una Administración Local nacida en 1998 de la agrupación de municipios para la gestión de la recogida y tratamiento de basuras (RSU). Está compuesta por un total de 17 municipios mancomunados: Alcalá del Río, Alcolea del Río, Brenes, Burguillos, Cantillana, Castilblanco de los Arroyos, Castilleja de la Cuesta, Gerena, Guillena, La Algaba, La Rinconada, Lora del Río, Peñafior, San Juan de Aznalfarache, Tocina, Villanueva del Río y Minas y Villaverde del Río. El objetivo de la Mancomunidad de Servicios La Vega es ofrecer servicios de recogida selectiva, gestión de residuos urbanos y reciclaje. Tratamiento, recuperación y valorización de los residuos. (Mancomunidad la Vega, 2016).

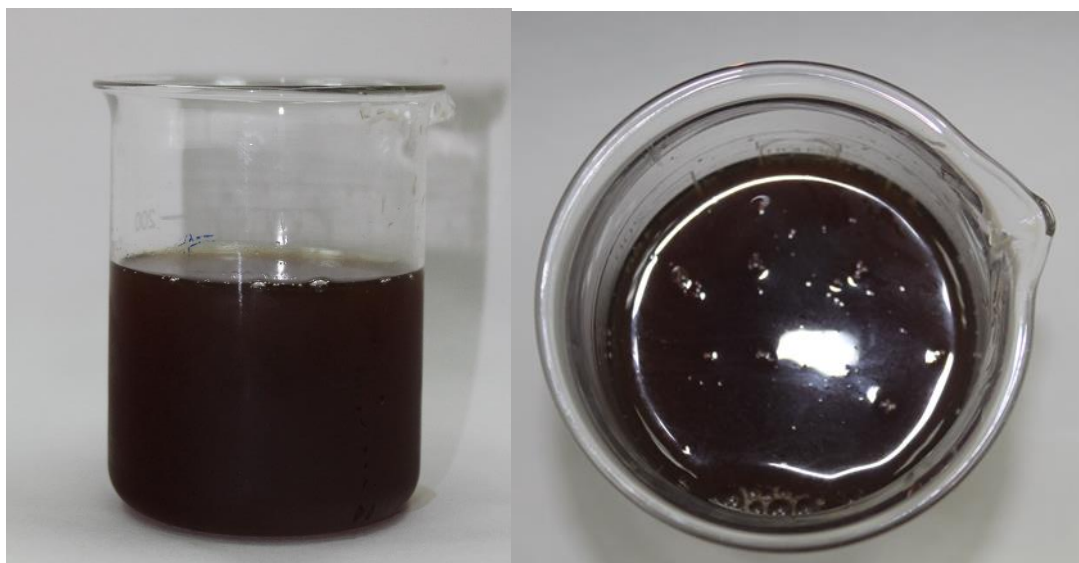
#### **4.1.3. Aguas de Glicerina**

La industria de fabricación de biodiesel genera una mezcla de sustancias cuyo componente orgánico mayoritario es el glicerol (propanotriol), también conocido como "glicerina". La cantidad de glicerina que resulta en el proceso de producción de biodiesel se aproxima al 10% del material de partida (Dasari et al., 2005). Si bien existe la posibilidad de transformar la glicerina para obtener glicerina pura, una sustancia con multitud de aplicaciones en diferentes industrias como la cosmética o la alimentaria. El proceso de purificación resulta muy costoso y, por tanto, es económicamente inviable para muchas de las plantas productoras de biodiesel. Del mismo modo, en la última década, el aumento en la producción de biodiesel ha sido tan significativo en la Unión Europea que a día de hoy la situación se caracteriza por la existencia de un excedente de glicerol con respecto a la demanda del mercado, lo cual ha provocado un catastrófico descenso en su precio. Por todo ello, la gestión del glicerol se presenta cada vez más complicada con un coste que a largo plazo supondrá un gran inconveniente para la industria del biodiesel. Entre las alternativas para el aprovechamiento del glicerol, la digestión anaerobia parece una vía atractiva como solución a la problemática de este sub-producto. El residuo de biodiesel, contiene compuestos orgánicos que pueden ser utilizados por las bacterias de forma bastante inmediata y, del mismo modo, puede ser



almacenado durante largos periodos de tiempo sin necesidad de refrigeración, lo que lo convierte en un sustrato ideal para procesos de co-digestión.

Hay que tener en cuenta que en este residuo también suelen estar presentes varios componentes inorgánicos que pueden afectar negativamente al proceso de digestión anaerobia como, por ejemplo, las sales de sulfato. La presencia de dichas sales favorece la proliferación de bacterias sulfatorreductoras que utilizan el ión sulfato como aceptor de electrones produciendo  $H_2S$ , cuya forma no-ionizada puede resultar tóxica para las bacterias metanogénicas si se superan ciertos límites de concentración (Vavilin et al., 1995).



*Ilustración 5. Glicerina*

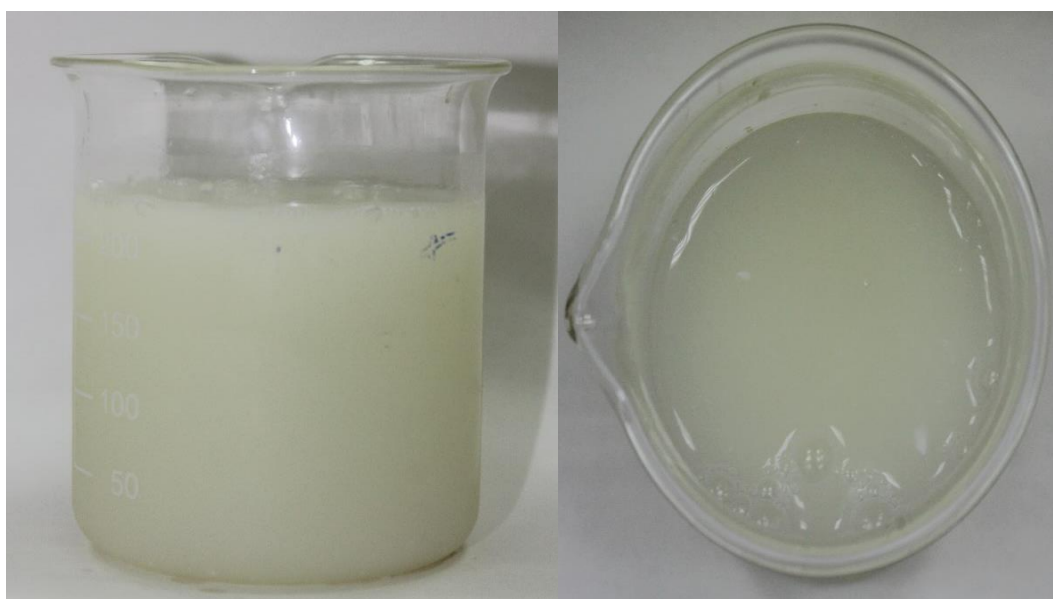
#### ENTABAN BIOCOMBUSTIBLES DEL GUADALQUIVIR SA.

La glicerina utilizada en este estudio es proporcionada por la empresa Entaban Biocombustibles del Guadalquivir SA, está ubicada en la localidad de Sevilla. Entaban Biocombustibles fue constituida en 2001, se dedica a la importación, exportación, comercio, reciclaje, extracción y venta, de aceites minerales, vegetales y animales. Además de la transformación y producción de biocombustibles y subproductos. (Entaban Biocombustibles, 2016).

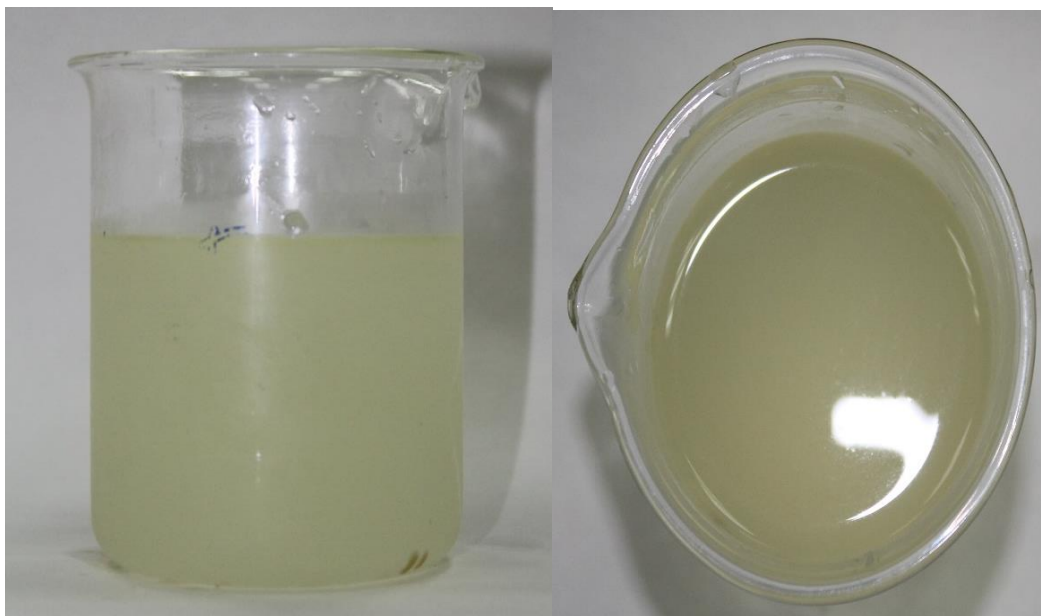
#### 4.1.4. Lactosuero

La industria láctea genera residuos líquidos, los cuales requieren disposición de una gran cantidad de inversión de capital (Donoso et al., 2009). La mayoría de plantas lácteas no tienen sistemas de tratamiento apropiados para la disposición de lactosuero, y el vertido de los constituyentes de lactosuero genera una significativa pérdida potencial alimenticio y de energía. Además, se caracterizan por una alta concentración de (Demanda química de oxígeno) DQO y (Demanda biológica de oxígeno) DBO<sub>5</sub>, representando alto contenido orgánico.

El lactosuero es definido como “la sustancia líquida obtenida por separación del coágulo o fase micelar de la leche en la elaboración de queso”. Esta separación se realiza a través de un proceso de coagulación de la leche, que se traduce en la floculación de las micelas de caseína, que se sueltan para formar un gel compacto aprisionando el líquido de dispersión que constituye el lactosuero (líquido translúcido verde). Existen varios tipos de lactosuero dependiendo principalmente de la eliminación de la caseína. El primero denominado **suero bruto** (sin cuajada y sin filo proteico), está basado en la coagulación por la renina a pH 6,5. El segundo, llamado **suero ácido** resulta del proceso de fermentación o adición de ácidos orgánicos o ácidos minerales para coagular la caseína como en la elaboración de quesos frescos (Parra, 2009).



*Ilustración 6. Suero Bruto "Los Vázquez"*



*Ilustración 7. Suero Ácido “Los Vázquez”*

La diferencia entre los dos tipos de lactosuero son el contenido de mineral, la acidez y la composición de la fracción de proteína de lactosuero. Aproximadamente, 9 kg de lactosuero resultan por cada kg de queso producido y el costo asociado con la disposición de este gran volumen de lactosuero es substancial. Comprende entre el 80-90% del volumen de la leche durante el proceso de elaboración del queso y contiene cerca del 50% de los sólidos presentes en la leche original, incluyendo el 20% de proteína, lactosa, minerales y vitaminas hidrosolubles. El lactosuero está compuesto de lactosa (5%), agua (93%), proteínas (0,85%), minerales (0,53) y una mínima cantidad de grasa (0,36%). El lactosuero causa contaminación ambiental debido a su alta DBO, siendo su disposición difícil y costosa. La presencia de lactosa en el lactosuero es la principal responsable para este valor de DBO alta (Mukhopadhyay et al., 2005). La producción de lactosuero a nivel mundial genera más de 145 millones de toneladas por año (Donoso et al., 2009). Lo anterior justifica el desarrollo de varios métodos de tratamientos para este residuo. A pesar de las diferentes posibilidades de la utilización de lactosuero, aproximadamente la mitad del producido a nivel mundial es descartado sin tratamiento (Donoso et al., 2009), lo cual crea un serio problema ambiental, debido a que afecta física y químicamente la estructura del suelo, generando una disminución en el rendimiento de cultivos agrícolas. Cuando se desecha en el agua, reduce la vida acuática al agotar el oxígeno disuelto (Parra, 2009).

## LOS VAZQUEZ

El **suero bruto** y el **suero ácido** utilizados han sido proporcionados por la Quesería Los Vázquez, más concretamente la fábrica situada en Castilleja del Campo (Sevilla).

### **4.1.5. Residuos industria del olivar (Alperujo y Alpechín)**

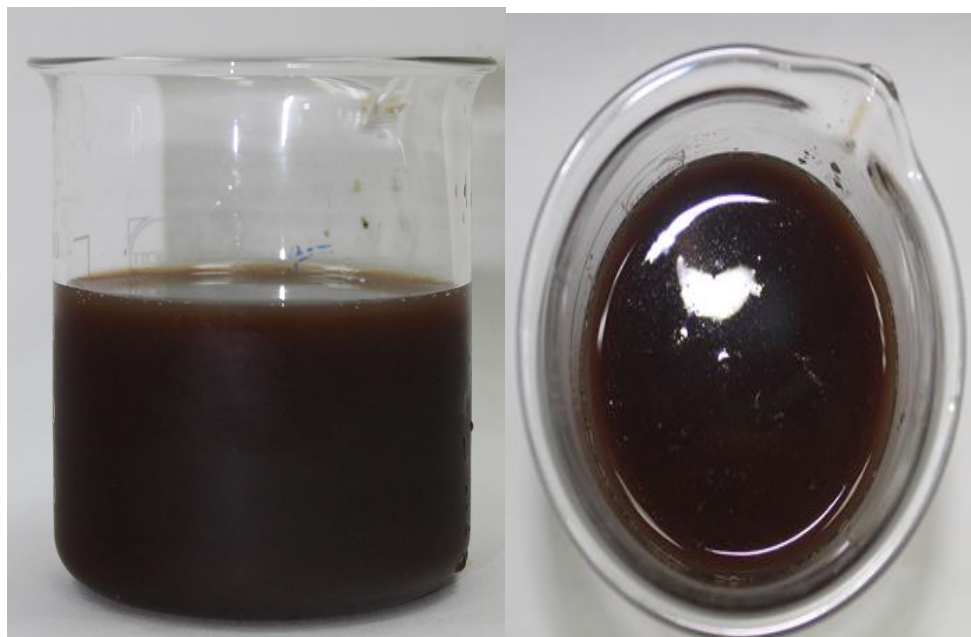
El olivo es uno de los cultivos históricos más importantes de la cultura mediterránea, y hoy en día supone una de las mayores fuentes de riqueza agrícola en los países del sur de la UE, norte de África y Próximo Oriente. Pero, es España el principal productor y exportador del mundo de aceite de oliva, y en concreto en la provincia de Jaén (que produce el 50% del total nacional y el 20% mundial), donde el sector oleícola tiene una importancia primordial. Precisamente por ello, es aquí donde más se tiene que incidir en la importancia de realizar una correcta depuración tras la obtención del aceite de oliva, ya que en España se generan cada año más de 1 millón de metros cúbicos de aguas residuales procedentes de almazaras.

El proceso de obtención del aceite se da por un sistema de dos fases que genera tres tipos de productos: aceite, **agua residual (Alpechín) y Alperujo**.

El agua residual generada por la actividad de las almazaras, comúnmente conocida **alpechín**, es una mezcla del agua de vegetación de la aceituna y del agua que se utiliza en las distintas etapas de la elaboración del aceite (acondicionamiento del fruto, añadida en los molinos, batidoras y centrifugadoras), que oscila entre 0,5 y 1,5 L kg<sup>-1</sup> de aceituna. El resultado es un líquido oscuro, con diversas sustancias disueltas y en suspensión. El alpechín recién producido, tiene un olor que recuerda al del aceite y, cuando fermenta, tiene un olor fétido.

El **Alpechín** no cumple la normativa para ser vertido a cauce público o alcantarillado, ni se puede utilizar para riego por su alta carga contaminante. Una solución tradicional hasta ahora ha sido el almacenamiento a lo largo de los años en balsas, en las que el residuo se va reconcentrando y aumentando año tras año su poder de contaminación. Asimismo las balsas tienen una capacidad limitada, por lo que cuando se colmatan surge la necesidad de construir otras nuevas, ocasionando los siguientes problemas en el sector: aumento de la superficie ocupada, desbordamiento, sanciones y paralización de la actividad, freno a

la implantación de sistemas de calidad, contaminación atmosférica (malos olores) y plagas de insectos, además de problemas en zonas con elevada pluviometría.



*Ilustración 8. Alpechín*

El efecto negativo de los vertidos de alpechín en las aguas puede comprenderse teniendo en cuenta que para depurar 1 L de alpechín se necesita una media de 60 g O<sub>2</sub>. Suponiendo que el agua receptora tiene 10 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> de oxígeno disuelto, para depurar el volumen medio de alpechín que se producen anualmente en Andalucía, 2 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, se necesitarían 10.000 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> de agua, el doble de la capacidad de todos los embalses de la cuenca del Guadalquivir (García Rodríguez, 1990).

Los efectos de los vertidos de alpechín sobre la calidad de las aguas superficiales se traducen en el aumento de las concentraciones de sólidos orgánicos e inorgánicos, de K, de P y de metales pesados. Los contaminantes que representan un mayor problema son los polifenoles y las grasas debido a su carácter polar e hidrófobo. Los polifenoles son considerados materia orgánica refractaria, debido a que inhiben la actividad bacteriana en el suelo, en concreto a las bacterias implicadas en el ciclo del Nitrógeno (Nitrosomonas y Nitrobacter). Este proceso de inhibición se produce cuando las concentraciones de polifenoles son altas. Asimismo, dichos vertidos producen la disminución drástica del oxígeno disuelto, a veces hasta niveles de anoxia, dando lugar a malos olores, desarrollo de microorganismos nocivos, asfixia y muerte de la fauna acuática.



El **alperujo** se caracteriza por su grado de humedad (55-60%) y por su contenido en compuestos orgánicos, principalmente azúcares y pectinas, procedentes del agua de vegetación.



*Ilustración 9. Alperujo*

El alto contenido en agua del alperujo dificulta su transporte y secado, mientras que la presencia de estos compuestos hace que su textura sea diferente a la del orujo clásico, confiriéndole un peor comportamiento en los procesos de secado y extracción (Alba Mendoza, 1994b). A las temperaturas de los hornos de secado, el alperujo se carameliza, dificultando la penetración del disolvente y disminuyendo el proceso extractivo (García Ortiz Rodríguez y Frías Ruiz, 1994).

El alperujo también es de extrema importancia, ya que su vertido incontrolado provoca problemas de coloración de las aguas, supone una amenaza para la biodiversidad acuática, deterioro del suelo, fitotoxicidad y olores. Por lo tanto, el alperujo es un producto altamente contaminante, pero que puede ser aprovechado como combustible. Una vez extraído el aceite residual puede utilizarse para fabricar compost. Esta última opción es ideal para las almazaras que están alejadas de las plantas de tratamiento.

El Alperujo y Alpechín utilizado han sido proporcionados por la cooperativa **AgroSegura**, situada en Puertas de Segura, Jaén.

#### 4.1.6. Cascara de arroz

En la industria arroceras el principal desecho que se genera es la cascarilla que recubre el grano de arroz. La cascarilla de arroz, compuesta fundamentalmente por fibras, celulosa y minerales, tiene una utilización restringida en el campo, debido a su alto contenido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), elemento que disminuye notablemente la digestibilidad de los alimentos producidos en el campo. Debido a su construcción físico-química, la cascarilla es además, un desecho de muy difícil biodegradación. Esto sumado al hecho de que en las plantas procesadoras de arroz, la cantidad de cascarilla generada oscila en cifras cercanas al 20% en peso de la producción total y, considerando el bajo peso específico de la cascarilla a granel ( $100 \text{ kgm}^{-3}$ ) ocasiona que la evacuación y el transporte de la cascarilla representa un problema considerable que implica unos costes elevados y un impacto perjudicial para el medio ambiente, ya que contamina las fuentes de agua .

La cáscara de arroz es un residuo agrícola que también puede ser utilizado como materia prima para la generación de energía debido a su elevado contenido energético ( $\text{PCI}=17,6 \text{ MJkg}^{-1}$  para un contenido de humedad de un 10%). Hoy en día, la mayor parte del excedente de cáscara de arroz, se destruye o se elimina por medio de la combustión a cielo abierto, lo que resulta en pérdidas de energía, así como la emisión de contaminantes hacia la atmósfera. En España se producen más de 700.000 toneladas de arroz al año a partir de 40.000 ha de cultivo.

La Cascara de Arroz utilizada ha sido proporcionada por Grupo TAR.



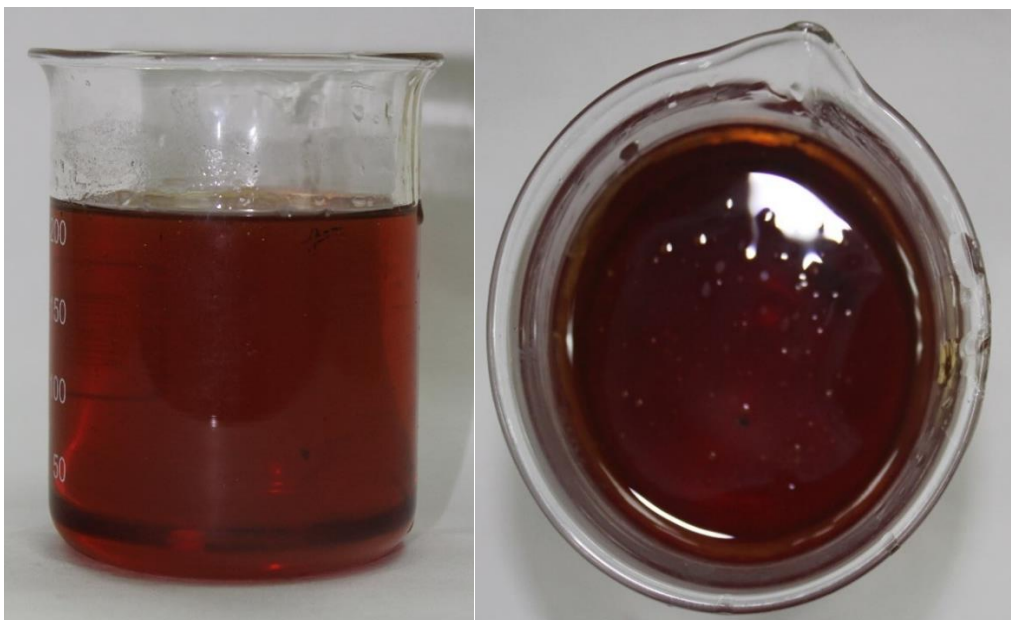
*Ilustración 10. Cascara Arroz*

#### 4.1.7. Aceite usado de cocina

En las industrias, centros y hogares se desechan distintas cantidades de aceite usado que pasan a ser un subproducto o un residuo dependiendo de si se reutilizan o se valorizan. Este tipo de residuo a nivel urbano e industrial es difícil de gestionar. El tratamiento en estaciones convencionales de depuración de aguas residuales puede ser problemático, incrementando los costes de procesos, ya que este residuo posee una gran cantidad de materia orgánica que induce la formación de grandes bolas de grasa, que dificultan los procesos físicos de tratamiento. Además las grasas pueden causar la obstrucción de las tuberías por la formación de una película en las paredes internas, lo cual contribuye a la reducción del diámetro eficaz de la tubería del alcantarillado. Como fuente de contaminación, un litro de aceite usado contiene aproximadamente 5.000 veces más carga contaminante que el agua residual que circula por las alcantarillas y redes de saneamiento y, puede llegar a contaminar 40.000 litros de agua, que es equivalente al consumo de agua anual de una persona en su domicilio. Si de forma inadecuada no se gestionan adecuadamente y se vierten, es una fuente de contaminación de los ríos, lagos, etc.

Los principales usos que recibe el aceite usado tras ser transformado en materia prima son la producción de biocarburantes (biodiesel), jabones y otros usos de la industria química (ceras, barnices).

El aceite utilizado ha sido proporcionado por un restaurante de Sevilla.



*Ilustración 11. Aceite Usado*



## **4.2. Microdigestores de una sola etapa**

Para la realización del ensayo con microdigestores de una sola etapa, se emplean a modo de reactor, botes de borosilicato de 250 mL. Estos botes quedan cerrados herméticamente por medio de un septum y un tapón de rosca.

### **4.2.1. Ensayo de Potencial Metanogénico (Biochemical Methane Potential-BMP)**

En este tipo de reactores se desarrolla la tecnología BMP. Se trata de un método basado en ensayos discontinuos o batch que se realizan bajo condiciones anaerobias y permiten obtener información acerca de la biodegradabilidad. En particular, los ensayos BMP son ampliamente utilizados para la estimación de la biodegradabilidad anaerobia o potencial de producción de metano (potencial metanogénico), así como para el estudio cinético del tratamiento de los residuos por digestión anaerobia. Si bien, este tipo de ensayos se han aplicado ampliamente para fangos de EDAR siguiendo mayoritariamente el protocolo descrito por Field et al (1988) (Soto et al., 1993; Fdz-Polanco et al., 2005).

El propósito de este tipo de ensayos es determinar la fracción de un residuo orgánico sólido que puede ser degradado anaeróbicamente, así como determinar su potencial metanogénico; es decir, la capacidad de dicho residuo para producir metano. La determinación de la biodegradabilidad de un residuo permite estimar la fracción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), que puede ser transformada potencialmente en metano y la que no es degradada anaeróbicamente, bajo las condiciones del ensayo.

El potencial metanogénico de un residuo (Biochemical Methane Potential, BMP) se define como la producción específica última de metano para un tiempo de degradación infinito. En la práctica, el ensayo tiene una duración finita y el potencial se obtiene por extrapolación de la curva. Si en lugar de cuantificar la cantidad de metano se determina la cantidad de biogás total, tendremos el potencial de producción de biogás.

Debido a la mayor influencia de las condiciones ambientales en la solubilidad del dióxido de carbono, y por consiguiente, en la composición del biogás, el potencial metanogénico es un parámetro más representativo y fiable que el potencial de producción de biogás. El

BMP se suele expresar como el volumen de metano producido en condiciones normales (0°C, 1atm) por unidad de residuo alimentado (kg SV). Debido a la complejidad de los residuos, no es posible conocer normalmente su composición, por lo que se utilizan los sólidos volátiles (SV) para describir su concentración.



*Ilustración 12. BMP*

A continuación se describen los principales parámetros que influyen en los ensayos de BMP, y el valor o rango de trabajo seleccionado para cada uno de ellos.

- Temperatura

Para los ensayos desarrollados se ha elegido la operación en condiciones mesófilas (35°C), que es la más ampliamente empleada a escala real (mayormente por cuestiones económicas y de tradición).

- Inóculo

Se trata de un componente imprescindible para el arranque de la digestión anaerobia ya que es la principal fuente de biomasa metanogénica activa. Dado que el proceso global de degradación anaerobia es complejo y requiere la presencia de distintos grupos de microorganismos, el origen y naturaleza del inóculo tiene una clara influencia en la cinética y niveles de degradación obtenidos. Se ha elegido trabajar con fango en digestión

proveniente de la estación de una planta de tratamiento de aguas residuales. El uso de inóculo procedente de EDAR municipales es recomendado por diferentes autores y/o metodologías de bibliografía (Shelton and Tiedje, 1984; Birch et al., 1989; Pagga & Beimborn, 1993; ISO 11734, 1995).

El fango digerido proviene de los reactores anaerobios de una EDAR que trata las aguas residuales urbanas de la cuenca sur de Sevilla (Dos Hermanas y el polígono industrial La Isla).

- Sustrato

Se trata de la principal fuente de energía orgánica que se incluye en la mezcla inicial del ensayo. El sustrato que se ha elegido es fango mixto proveniente de la estación de una planta de tratamiento de aguas residuales.

- Co-sustrato

Se trata del residuo o mezclas de residuos cuya biodegradabilidad se quiere determinar.

- Relación sustrato o Co-sustrato / microorganismos (S0/X0).

La cantidad de metano obtenida a partir de la degradación anaerobia de un determinado residuo está estrechamente relacionada con la composición del mismo. De este modo, una caracterización del residuo orgánico seleccionado que permita determinar su contenido de materia orgánica, así como la naturaleza de la misma puede resultar de utilidad a la hora de predecir, e incluso interpretar los resultados de un test BMP. Si bien es cierto que, las especies metanogénicas pueden utilizar como sustrato un número limitado de sustancias (ácido acético, ácido fórmico, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, metanol, etc.). Las poblaciones bacterianas no-metanogénicas presentes en el consorcio de un reactor anaerobio son capaces de hidrolizar y/o fermentar una gran variedad de compuestos. En consecuencia, el número de moléculas orgánicas biodegradables bajo condiciones anaerobias es elevado, aunque hay que tener en cuenta que algunos compuestos son de naturaleza recalcitrante y no se degradan mediante el tratamiento anaerobio. Concretamente, la presencia de varios grupos orgánicos como los halógenos, los grupos alquilo o los grupos sulfo y nitro se ha relacionado con la imposibilidad de degradar determinadas moléculas complejas en procesos de biometanización. Asimismo, otras sustancias como los hidrocarburos alifáticos saturados, los complejos lignocelulósicos y algunas sustancias

húmicas, se consideran compuestos de muy poca biodegradabilidad en condiciones anaerobias.

Debido a la utilización de diferentes residuos y la composición de éstos, se lleva a cabo la Relación sustrato / microorganismos ( $S_0/X_0$ ). El efecto de esta relación no se suele tener en cuenta en los protocolos normalizados existentes (Angelidaki et al. 2009). Sin embargo, los resultados de biodegradabilidad se ven fuertemente afectados con el valor de la relación sustrato/microorganismos. Se ha encontrado un efecto positivo en la relación  $S_0/X_0$  con la velocidad específica de producción de gas. Según Buitrón (2002), a mayores relaciones mayor velocidad específica de producción de biogás. En el desarrollo de los ensayos se ha elegido una relación sustrato/inoculo de 0.5 gSVs/gSVi para todos los ensayos realizados.

- Número de réplicas.

La muestra de fango puede presentar alta heterogeneidad por lo que es conveniente distribuir el fango en cada ensayo de la manera más homogénea. A pesar de tomarse las precauciones adecuadas, no siempre se evitan los problemas derivados de este hecho. Con el fin de minimizar los efectos y obtener resultados fiables, es conveniente transferir el fango de manera aleatoria entre todos los ensayos y con la mayor mezcla posible. Por otra parte, se recomienda la realización de ensayos por triplicado (ASTM D 5210 (1992), ISO 11734 (1995)). Todos los ensayos realizados se han realizado por triplicado.

#### **4.2.2. Aplicabilidad de los test BMP**

Los test BMP, u otros test discontinuos de biodegradabilidad anaerobia, se realizan con tres propósitos principales:

- Analizar la biodegradabilidad anaerobia mediante la determinación de la producción de biogás y metano.
- Cuantificar la actividad de un inóculo (material procedente de un tratamiento previo de digestión anaerobia que es utilizado como fuente de biomasa metanogénica activa para nuevos procesos anaerobios).
- Estudiar la inhibición de la digestión anaerobia causada por diferentes compuestos

### **4.2.3. Objetivos de los test BMP en esta investigación**

Para llevar a cabo el objetivo general, se han seleccionado una serie de residuos cuyo co-tratamiento puede resultar ventajoso en términos energéticos y de centralización del tratamiento, puesto que la alternativa de la co-digestión puede contribuir a solucionar la problemática de distintos sectores simultáneamente, así como a maximizar la valorización de los residuos orgánicos en cuestión. Por lo tanto, se han llevado a cabo una serie de ensayos experimentales que han permitido alcanzar los objetivos necesarios para lograr el principal fin que se persigue en este estudio.

A continuación se describe con más detalle los diferentes objetivos establecidos.

1. Estudio de diferentes residuos, en micro-digestores mediante la tecnología BMP.
2. Evaluar la viabilidad de los diferentes residuos de difícil gestión en un proceso anaerobio, comparando su producción de gas con la generada por un residuo ya conocido.
3. Evaluar la viabilidad de los residuos de difícil gestión junto al lodo de depuradora en un proceso de co-digestión anaerobia, comparando su producción de gas con la generada por un residuo ya conocido.
4. Evaluar la viabilidad de la mezcla de residuos en un proceso de digestión anaerobia, comparando su producción de gas con la generada por un residuo ya conocido. Consiguiendo una estabilización del proceso y una producción de biogás constante y significativa.
5. Evaluar la viabilidad de la mezcla de residuos junto al lodo de depuradora en un proceso de co-digestión anaerobia, comparando su producción de gas con la generada por un residuo ya conocido. Consiguiendo una estabilización del proceso y una producción de biogás constante y significativa.
6. Evaluar la viabilidad de las mezclas de diferentes residuos orgánicos en un proceso anaerobio, estudiando el incremento en la producción de gas del conjunto de residuos con respecto a su producción de gas individual.
7. Determinar los efectos del uso de co-residuos de diferente naturaleza en la biodegradabilidad y el potencial de producción de metano de lodo de EDAR.
8. Identificar el residuo más adecuado para llevar a cabo la co-digestión a escala piloto.

9. Determinar la biodegradabilidad y el potencial de producción de metano de los distintos residuos orgánicos.

#### **4.2.4. Procedimiento para la realización de los ensayos BMP.**

El ensayo BMP se ha realizado empleando un montaje de laboratorio, como se puede observar en la ilustración 13, para llevar a cabo los ensayos, se ha empleado a modo de reactor botellas de borosilicato de 250 mL. El volumen de llenado de los ensayos es de 150 mL, dejando aproximadamente 100 mL para el biogás generado. Estos botes quedan cerrados herméticamente por medio de un septum y un tapón de rosca.



*Ilustración 13.BMP*

Se ha utilizado como inóculo, fango en digestión procedente de los reactores anaerobios de una planta de tratamientos de aguas residuales. En el trabajo de Angelidaki et al. (2009), se describe un protocolo que incluye indicaciones y recomendaciones para realizar un test BMP de residuos orgánicos sólidos y cultivos energéticos, según el cual es aconsejable utilizar como inóculo fango procedente de reactores anaerobios.

Es conveniente introducir el inóculo y fango mixto en una cámara caliente a 35°C durante al menos tres días antes de iniciar el ensayo. Este tiempo es suficiente para readaptar el lodo a la temperatura del ensayo.

En cuanto a la producción de biogás y de metano, se han cuantificado manualmente utilizando un transductor de presión (ifm PN 5007). Los valores de presión son convertidos a volúmenes, utilizando la ecuación de los gases ideales, mientras que la composición del biogás se determina utilizando baño de NaOH. La muestra de biogás se toma con una jeringuilla especial que permite su inyección directa para pasarlo por el baño. Al inicio del experimento se miden con mayor frecuencia tanto la presión, como la composición del biogás. Tras cada medida, se vacía el gas acumulado en el espacio superior de la botella hasta que la presión indicada por el transductor iguala el valor de la presión atmosférica. El tiempo de ensayo utilizado para los test de biodegradabilidad ha sido aproximadamente de 21 días (fase 1), 42 días (fase 2) y, 63 días (fase 3).

Aparte del inóculo y del residuo, en la mezcla inicial se ha añadido bicarbonato hasta obtener una concentración de  $5 \text{ g CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$  y se ha ajustado el pH al mismo valor del que se encuentra el inóculo, empleando una disolución de HCl o una disolución de NaOH. Asimismo, se ha incluido una pequeña cantidad de una disolución que contiene varios macronutrientes, micronutrientes y elementos traza en una concentración de  $1 \text{ mL L}^{-1}$ .

Asimismo, se utiliza un ratio inóculo/sustrato ó co-sustrato (ISR en sus siglas en inglés, es decir, Inoculum to Substrate ratio) de  $0,5\text{gSV/gSV}$  como se ha comentado anteriormente en el apartado 5.1 relación microorganismo/ sustrato.

Los ensayos se han realizado en todos los casos por triplicado, incluyendo además ensayos paralelos con inóculo a modo de control (o blanco). Una vez preparados los ensayos, se han introducido en un baño termostático a  $36^\circ\text{C}$ , de tal forma que en todo momento se ha trabajado en el rango mesófilico de temperatura.

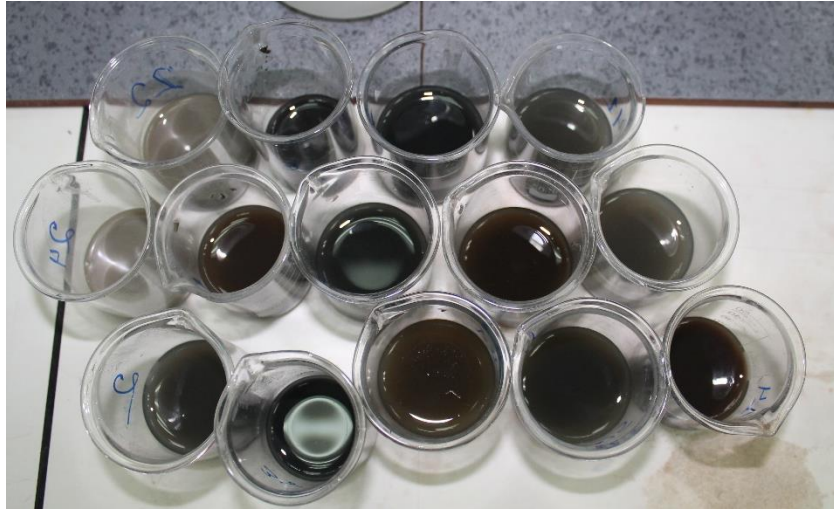
#### **4.2.4.1. Procedimiento de los ensayos BMP.**

Para el estudio de los BMP se ha programado un seguimiento:

#### **Día de Caracterización**

Se debe hacer la caracterización del fango que se va a utilizar como inóculo o fuente principal de biomasa metanogénica activa, así como los sustratos. Por lo tanto, este día se dedica a la realización de las siguientes analíticas: Sólidos Totales, Sólidos Volátiles, DQO (Demanda Química de Oxígeno total), Alcalinidad Total, Ácidos Grasos Volátiles,

pH y Conductividad. El resultado de mayor urgencia por obtener se trata de los sólidos volátiles, se obtiene al día siguiente como viene contemplado en el protocolo de sólidos.



*Ilustración 14. Caracterización Muestras*



*Ilustración 15. Determinación de gSV*

### **Puesta en funcionamiento**

Este día se toman los datos para el cálculo de los Sólidos volátiles del inoculo, sustrato y co-sustrato, así como la mezcla de sustrato y co-sustrato. Para el cálculo del volumen sustrato ( $S_0$ ) y el inoculó ( $X_0$ ) correspondiente a una relación:

$$\frac{S_0}{X_0} = 0,5 \text{ gSV/gSV}$$



Para montar el test de biodegradabilidad, en primer lugar hay que poner en funcionamiento el equipo Shacker ajustando la temperatura a 36°C. En cuanto a la preparación de las botellas para el ensayo, se realiza de la siguiente manera:

1. Inicialmente, se añade la cantidad de inóculo (fango) necesaria.
2. A continuación, se adiciona la cantidad de sustrato o co-sustrato necesario, calculado mediante la relación sustrato/inóculo
3. El siguiente paso es pesar el bicarbonato en un peso de mayor precisión
4. La cantidad precisa de solución de nutrientes se toma con una pipeta milimetrada y se vierte al interior de la botella.

Las bacterias metanogénicas, además de tratarse de especies de lento crecimiento, precisan de ciertos nutrientes que pueden no hallarse en las cantidades suficientes en los sustratos que se utilizan en el ensayo. Por ello, se añade una solución para asegurar que el proceso no se vea limitado por una falta de nutrientes (Tabla 1).

*Tabla 1. Micro-Macronutrientes*

<b>Macronutrientes</b>	<b>Concentración</b>	<b>Unidades</b>
<b>NH<sub>4</sub>Cl</b>	170	gL <sup>-1</sup>
<b>KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub></b>	37	gL <sup>-1</sup>
<b>CaCl<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O</b>	8	gL <sup>-1</sup>
<b>MgSO<sub>4</sub>.4H<sub>2</sub>O</b>	9	gL <sup>-1</sup>
<b>Micronutrientes</b>		
<b>FeCl<sub>3</sub>.4H<sub>2</sub>O</b>	2.000	mgL <sup>-1</sup>
<b>CoCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O</b>	2.000	mgL <sup>-1</sup>
<b>MnCl<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O</b>	500	mgL <sup>-1</sup>
<b>CuCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O</b>	30	mgL <sup>-1</sup>
<b>ZnCl<sub>2</sub></b>	50	mgL <sup>-1</sup>
<b>H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub></b>	5	mgL <sup>-1</sup>
<b>(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>.Mo<sub>7</sub>O<sub>4</sub>.4H<sub>2</sub>O</b>	90	mgL <sup>-1</sup>
<b>Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>.5H<sub>2</sub>O</b>	100	mgL <sup>-1</sup>
<b>NiCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O</b>	50	mgL <sup>-1</sup>



*Ilustración 16. Solución de Nutrientes*

5. Se continúa con la corrección del pH añadiendo una disolución de HCl 3N poco a poco hasta alcanzar un valor cercano a 7,5.
6. Por último, se sellan herméticamente las botellas y se introducen en el equipo Shacker.



*Ilustración 17. BMP antes de ser metidos al equipo Shacker*

### **Analíticas inicio del ensayo**

El día siguiente a la puesta en marcha o arranque del test BMP, se debe realizar una mezcla que represente cada uno de los ensayos realizados. La mezcla inicial de los

ensayos, se procesa conforme a las características del residuo sólido al que corresponde. Las analíticas a realizar son las siguientes analíticas: Sólidos Totales, Sólidos Volátiles, DQO (Demanda Química de Oxígeno total), Alcalinidad Total, Ácidos Grasos Volátiles, pH y Conductividad.

### **Analíticas durante el Ensayo: Producción y Composición de Biogás**

Durante los ensayos se mide periódicamente la presión del espacio superior de las botellas con el transductor digital.

### **Analíticas del final del ensayo**

Aproximadamente, a los 21 días del inicio de un test BMP, éste se da por finalizado. Las analíticas a realizar individualmente con cada botella son: Sólidos Totales, Sólidos Volátiles, DQO (Demanda Química de Oxígeno total), Alcalinidad Total, Ácidos Grasos Volátiles, pH y Conductividad.



*Ilustración 18. Caracterización del BMP al finalizar los 21 días (DQO).*

### **Fases**

Para la realización de las fases temporales de los ensayos, se deja decantar el fango procedente de los BMP después de los 21 días, y el fango decantado se utiliza como inóculo en la siguiente fase (42 días), de igual forma se realiza para la tercera fase (63 días)

#### 4.2.5. Componentes de la mezcla BMP

Las mezclas iniciales preparadas para llevar a cabo los diferentes ensayos de este proyecto, están compuestas de los materiales de naturaleza orgánica que se describen a continuación.

1. Ensayo de **Digestión anaerobia mono-sustrato** en el que se han analizado cada uno de los residuos individualmente.

- a. Inóculo

Fango en digestión proveniente de la estación de una planta de tratamiento de aguas residuales, en la primera fase del ensayo. En las fases dos y tres de los ensayos se utiliza fango adaptado (inóculo) proveniente de la fase anterior.

- b. Sustrato/Co-sustrato

Residuos cuya biodegradabilidad se quiere determinar (fango mixto, cascara de arroz, suero bruto, suero ácido, alperujo, aguas de glicerina, lixiviado, alpechín y aceite usado de cocina).

2. Ensayos de biodegradabilidad anaerobia de **Co-digestión anaerobia de Fango mixto y residuos orgánicos**, se ha estudiado la complementariedad de los residuos con el lodo de depuradora

- a. Inóculo

Fango en digestión proveniente de la estación de una planta de tratamiento de aguas residuales, en la primera fase del ensayo. En las fases dos y tres de los ensayos se utiliza fango adaptado (inóculo) proveniente de la fase anterior.

- b. Sustrato

Dada su problemática de gestión, se ha optado por estudiar la co-digestión del fango mixto de la EDAR de la cuenca sur de Sevilla “Copero”.

- c. Co-sustrato

Residuos cuya biodegradabilidad se quiere determinar.

Para la realización de los BMP, se ha procedido a realizar una mezcla de sustrato y co-sustrato con una relación de 300 mL de sustrato (fango mixto) y 90 mL de co-sustrato.

- Fangos mixtos y cascara de arroz
- Fangos mixtos y Suero bruto
- Fangos mixtos y Suero ácido
- Fangos mixtos y Alperujo
- Fangos mixtos y Aguas de glicerina
- Fangos mixtos y Lixiviado
- Fangos mixtos y Alpechín
- Fangos mixtos y Aceite usado de cocina

3. Ensayos de biodegradabilidad anaerobia, Digestión **anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos**, con el objetivo de estudiar sustratos que enmienden el comportamiento de ciertos residuos difícilmente degradables.

a. Inóculo

Fango en digestión proveniente de la estación de una planta de tratamiento de aguas residuales, en la primera fase del ensayo. En las fases dos y tres de los ensayos se utiliza fango adaptado (inóculo) proveniente de la fase anterior.

b. Co-sustrato

Mezclas de residuos cuya biodegradabilidad se quiere determinar.

Para la realización de los BMP, se ha procedido a realizar una mezcla de co-sustratos con una relación de 50 % de cada residuo.

- Cascara de arroz y Lixiviado
- Suero bruto y Alperujo
- Alperujo y Alpechín
- Aguas de Glicerina y Suero bruto
- Lixiviado y Suero bruto
- Aceite usado de cocina y Alperujo
- Aguas de Glicerina y Lixiviado

4. Ensayos de biodegradabilidad anaerobia, **Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica**, donde se ha estudiado la complementariedad de las mezclas de estos residuos con el lodo de depuradora.

a. Inóculo

Fango en digestión proveniente de la estación de una planta de tratamiento de aguas residuales, en la primera fase del ensayo. En las fases dos y tres de los ensayos se utiliza fango adaptado (inóculo) proveniente de la fase anterior.

b. Sustrato

Dada su problemática de gestión, se ha optado por estudiar la co-digestión del fango mixto de la EDAR de la cuenca sur de Sevilla “Copero”.

c. Co-sustratos

Mezcla de residuos cuya biodegradabilidad se quiere determinar.

Para la realización de los BMP, se ha procedido a realizar una mezcla de sustrato y la mezcla de co-sustratos con una relación de 300 mL de sustrato (fango mixto) y 90 mL de la mezcla de co-sustratos.

- Fango mixto con la mezcla de Cascara de arroz y Lixiviado
- Fango mixto con la mezcla de Suero bruto y Alperujo
- Fango mixto con la mezcla de Alperujo y Alpechín
- Fango mixto con la mezcla de Aguas de Glicerina y Suero bruto
- Fango mixto con la mezcla de Lixiviado y Suero bruto
- Fango mixto con la mezcla de Aceite usado de cocina y Alperujo
- Fango mixto con la mezcla de Aguas de Glicerina y Lixiviado

#### 4.2.6. Equipo experimental

Para llevar a cabo el ensayo BMP, es preciso emplear el material que se describe a continuación.

##### 4.2.6.1. Reactores BMP

Se tratan de botellas de borosilicato de 250 ml de capacidad. Deben estar cerradas para conseguir un ambiente carente de oxígeno (condiciones anaerobias) en el interior de las mismas, así como evitar pérdidas del biogás producido. En este caso, el cierre hermético se ha conseguido con un septum colocado con un tampón de rosca para poder encajarlo correctamente.



*Ilustración 19. Reactor de 250 ml*



*Ilustración 20 Tampón septum y Tampón rosca*

#### 4.2.6.2. Sistema de agitación

Se han utilizado un sistema de agitación shacker (New Brunswick Scientific, G10 – Gyrotory Shacker).



*Ilustración 21. Shacker*

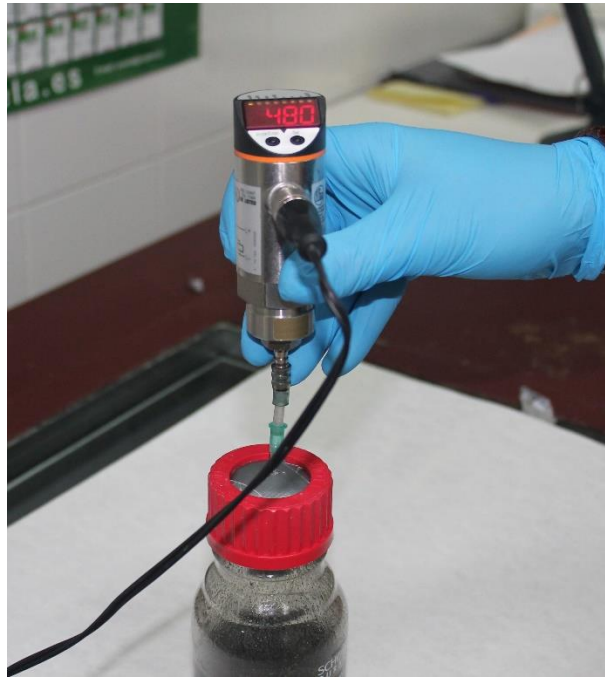
#### 4.2.6.3. Medida de presión

Se trata de un dispositivo electrónico para realizar la medida de presión debida a la acumulación de biogás en el espacio libre que se deja en las botellas de los ensayos. El transmisor de presión utilizado ha sido el ifm PN5007 con un rango de medición de 0 a 1bar, ilustración 22. Se ha utilizado una jeringuilla para medir el biogás de la muestra a través del septum de las botellas.



*Ilustración 22. Medidor Presión*





*Ilustración 23. Medidor Presión*

#### **4.2.6.4. Pipeta**



*Ilustración 24. Pipeta para recogida de Muestra*

#### **4.2.6.5. Estufa**

Utilizada para la determinación de los sólidos a analizar



*Ilustración 25. Estufa utilizada cuantificación sólido*

#### **4.2.6.6. Mufla**

Utilizada para la determinación de los Sólidos Volátiles



*Ilustración 26. Mufla*

#### **4.2.6.7. Balanza**

Se utiliza para el peso determinar los sólidos.



*Ilustración 27. Balanza de Precisión*

#### **4.2.6.8. Desecador**

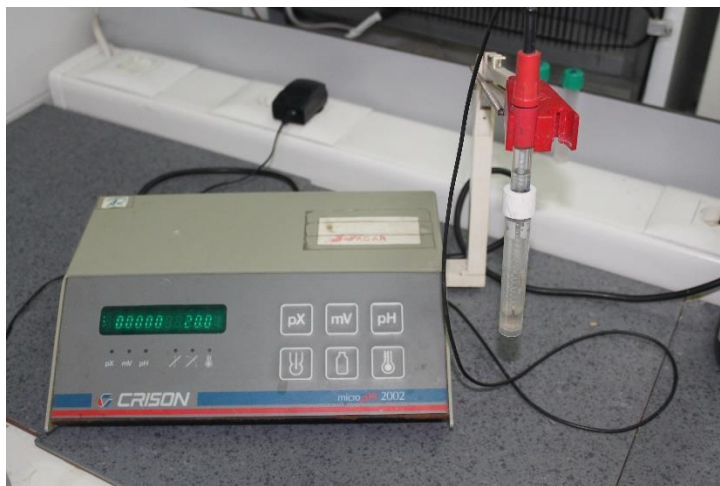
Utilizada en la determinación de sólidos para el enfriamiento de las muestras a su salida de la estufa.



*Ilustración 28. Desecado*

#### 4.2.6.9. pH

Es utilizada para la medición diaria del pH de la biomasa en digestión. Además se utiliza para controlar las valoraciones en los análisis de alcalinidad y AGV.



*Ilustración 29. pH-metro*

#### 4.2.6.10. Conductivímetro

Utilizado para la medición diaria de la conductividad de la biomasa en digestión. En el apartado de métodos analíticos se especificará sus características.



*Ilustración 30. Conductivímetro*

#### **4.2.6.11. Centrífuga**

Utilizada para realizar los análisis de la alcalinidad soluble, donde se retira parte de los sólidos.



*Ilustración 31. Centrífuga*

#### **4.2.6.12. Dispensador programado**

Dado que trabajamos periódicamente con los mismos volúmenes, se programan dispensadores conectados a botes que contienen los compuestos que son necesarios en el proceso, facilitando así la toma de volúmenes y la realización de los análisis.

#### **4.2.6.13. Buretas electrónicas**

Para realizar las valoraciones utilizamos buretas electrónicas, mucho más exactas en la medida que las manuales.



*Ilustración 32 Buretas electrónicas*

#### **4.2.6.14. Placa calefactora**

Utilizada para llevar a ebullición las muestras de distintos análisis, como por ejemplo, el líquido resultante después de haberle realizado la alcalinidad se debe calentar para realizarle los ácidos grasos volátiles.



*Ilustración 33 Placa calefactora*

#### **4.2.6.15. Termoreactor**

Pequeño digestor con receptáculos preparados para tubos de ensayos donde se realiza la digestión de la muestra diluida, para posteriormente realizar los análisis de DQO.



*Ilustración 34 Termoreactor*

### **4.3. Métodos analíticos**

A continuación, se describen de forma breve las técnicas analíticas usadas (Standard Methods for the examination of water and wastewater, APHA, 2005).

Para el análisis de los procesos se han determinado cada uno de los factores que se indican a continuación. Dichos factores son los que se han considerado variables clave para el seguimiento y chequeo del proceso.

#### **4.3.1. Determinación del pH (APHA, 4500-H<sup>+</sup>,2015)**

La determinación electrométrica del pH se basa en la medida de la actividad de los iones de H<sup>+</sup> por mediciones potenciométricas utilizando, un electrodo indicador de vidrio, otro de referencia y tampones de pH 4 y 7.

La fuerza electromotriz (fem) producida en el sistema de electrodo de vidrio, varía linealmente con el pH y esta relación se describe comparando la fem medida con el pH de diferentes tampones. El pH de la muestra se determina por extrapolación.

La temperatura afecta a la medida del pH de dos formas, efectos mecánicos producidos por cambios en las propiedades de los electrodos y efectos químicos causados por cambio de equilibrio. De esta forma, es conveniente proceder a la medida del pH de la muestra siempre a la temperatura ambiente.

Un pH elevado indica una baja concentración de iones H<sup>+</sup>, y por tanto un medio alcalino. Por el contrario, un pH bajo indica la acidificación del medio. Dado que los principales microorganismos involucrados en este proceso trabajan de forma óptima en un rango de pH de 7-8, éste debe mantenerse cercano a la neutralidad.

Se ha utilizado un pH-metro CRISON GLP 21+ que contiene una sonda portátil CRISON (5200T).



#### **4.3.2. Determinación de la conductividad eléctrica (CE) (APHA, 2510, 1992)**

La conductividad es una medida de la propiedad que poseen los iones presentes en disolución acuosa para producir corriente eléctrica. La conductividad que varía en función de la temperatura, está estrechamente ligada a la concentración de sustancias disueltas y a su naturaleza.

Las sales minerales (sustancias inorgánicas, ácidos, bases) son en general, buenas conductoras. Por el contrario, los compuestos orgánicos que no están disociados tienen escasa conductividad. La conductividad eléctrica de las aguas superficiales suele encontrarse en el intervalo entre 200 y 1.000  $\mu\text{Scm}^{-1}$ , mientras que las aguas subterráneas presentan valores algo mayores, ente 500 y 1.500  $\mu\text{Scm}^{-1}$ . El intervalo de conductividad para las aguas residuales urbanas oscila entre 1 y 4  $\text{mScm}^{-1}$ .

Esta medida no da una idea precisa de la carga contaminante, pero sí orienta en sus posibles usos en aplicaciones agrarias.

La conductividad eléctrica es una expresión de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica, que es función de la presencia de iones en disolución y de su concentración total.

La medida de CE ofrece una importante información sobre el contenido en sales de las aguas, relacionado con los sólidos totales, el grado de mineralización y requerimientos previos para otras analíticas.

La CE se determina utilizando un equipo multiparamétrico Eutech, modelo PCD 650, con sonda de cuatro células en vidrio-platino, que permite tomar medidas de la conductividad, resistividad, salinidad y sólidos disueltos totales.

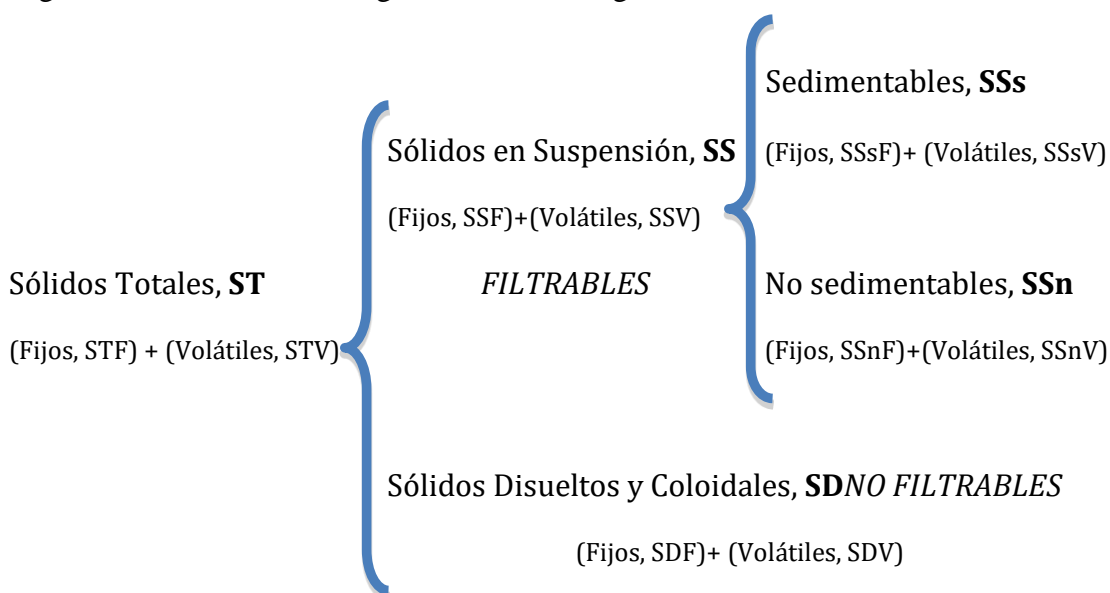
Presenta una precisión de  $\pm 0,08 \text{ mS cm}^{-1}$ .

Los resultados se expresan como  $\text{mS cm}^{-1}$ .

### 4.3.3. Sólidos Totales (ST): Sólidos totales fijos (STF) y Sólidos totales Volátiles (STV) (APHA, 2540 A, 1992).

Es la característica física más importante del agua residual. El término engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Es un parámetro bastante importante en el control de procesos físicos y biológicos.

El contenido en materia sólida del agua residual está formado por varias fracciones que engloban tanto los sólidos orgánicos como inorgánicos.



Con la medida de los sólidos totales fijos y volátiles, es posible determinar la cantidad de materia sólida inerte y la cantidad de materia orgánica o biomasa existente en la muestra.

Equipos necesarios: Balanza analítica, estufa y mufla

Material: Cápsula, espátula

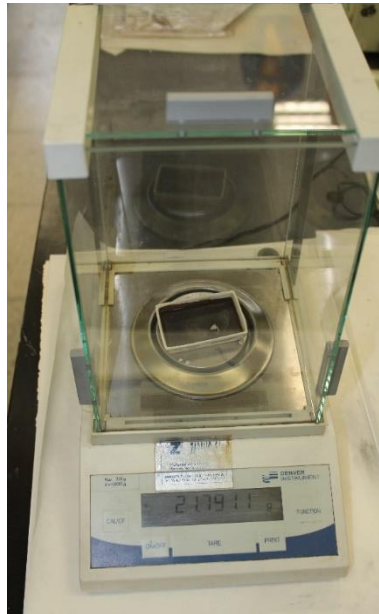
Previamente, se debe preparar la cápsula donde se va a proceder al análisis de la muestra. Si en la medición se pretende analizar SV, se debe incinerar la capsula a  $550 \pm 50^{\circ}\text{C}$  durante al menos 1 hora en una mufla. Si por lo contrario, solamente se pretende hacer el análisis de los ST, se debe calentar la cápsula a  $103\text{-}105^{\circ}\text{C}$  durante al menos 1 hora en una estufa. Después de preparar la cápsula, se debe conservar en un desecador y pesar inmediatamente antes de usar. Lo más cómodo es realizar primero los sólidos totales y después de pesarlo, llevarlo a la mufla y obtener así los volátiles.

Para realizar el análisis de los Sólidos totales se vierten 25 mililitros en una cápsula, la cual se ha pesado con antelación. Posteriormente, se introduce en la estufa durante 24 horas. Transcurridas las 24 horas, se debe dejar en el desecador unos 20 minutos y pesarla en la balanza analítica.



*Ilustración 35. Crisoles dentro de la Estufa*

Para determinar los sólidos volátiles, la misma muestra con la que se ha medido los sólidos totales se llevan a la mufla a 550°C durante 20 minutos. Al sacar la cápsula transcurridos los 20 minutos, se lleva a la estufa para suavizar la temperatura con la intención de no producir un cambio brusco de temperatura y producir un error de pesado. Se repite el proceso y, en este caso se lleva el recipiente al desecador durante 10 minutos. Por último, se vuelve a pesar la cápsula y se anota el valor añadido.



*Ilustración 36. Pesada del crisol tras la Estufa*



*Ilustración 37. Crisoles después de la Mufla 550°C*

$$ST = \frac{B - A}{V} * 1000 \qquad SV = \frac{B - C}{V} * 1000$$

Siendo:

ST: Sólidos totales (g.L<sup>-1</sup>).

SV: Sólidos volátiles (g.L<sup>-1</sup>).

A: Tara de la cápsula vacía (g).

B: Peso de cápsula + muestra tras 24 horas a 105°C.

C: Peso de cápsula + muestra tras 20 minutos a 550°C.

V: Volumen de muestra (L).

#### **4.3.4. Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) (APHA, 5220 C, 2005)**

La DQO representa la cantidad de oxígeno necesario para oxidar por vía química la totalidad de la materia orgánica. El requerimiento de oxígeno químico, se utiliza como una medida del equivalente de oxígeno del contenido de materia orgánica de una muestra susceptible de oxidación por un oxidante químico fuerte. Para las muestras de una fuente específica, la DQO puede relacionarse empíricamente con la demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>). La prueba es útil para monitorizar y controlar después de haber establecido la correlación. Se prefiere el método del reflujo dicromato a los procedimientos que utilizan otros oxidantes debido a su mayor capacidad oxidante, a su aplicabilidad, a una mayor variedad de muestras y a su fácil manipulación. La oxidación de la mayoría de compuestos orgánicos es del 95 al 100 por 100 del valor teórico. La piridina y los compuestos relacionados con ella resisten a la oxidación, y los compuestos orgánicos volátiles solo son oxidados en la medida en que permanecen en contacto con el oxidante. El amoníaco, presente en la materia orgánica que contiene nitrógeno, o liberado desde ella, no es oxidado en ausencia de una concentración significativa de iones cloruro libres. El contenido en cloruros no debe superar los 1.000 mgL<sup>-1</sup>.

La DQO representa la cantidad de oxígeno necesario para oxidar por vía química la totalidad de la materia orgánica.

La DQO se determina titulométricamente por la oxidación con dicromato potásico, según el método de reflujo cerrado.

Tras haber tomado 10 mL de la muestra y enrasar hasta 2 litros, se procede a tomar 5 mililitros, introduciéndolo en un tubo de ensayo. A continuación, se añaden 3mL de disolución de digestión de dicromato potásico 0,066N y 7 mL de reactivo ácido sulfúrico de plata (catalizador) de forma que se cree una capa de ácido debajo de la disolución de digestión de la muestra.



*Ilustración 38. Disolución muestra para realización DQO*

Se debe tener mucho cuidado ya que se produce una reacción fuertemente exotérmica, por lo que el tubo se calienta a añadir los reactivos.



*Ilustración 39. Realización DQO*

Colocar los tubos en el termoreactor, previamente calentado, a 150°C y mantener la digestión durante 2 horas.



*Ilustración 40. Tubo DQO salida termoreactor*

Una vez transcurridas las dos hora, se enfría a temperatura ambiente. Una vez enfriadas las muestras, se procederá a su valoración y para ello, se abre el tubo, se añaden tres gotas de indicador de ferroina, un imán de agitación y se valora con una disolución sulfato de hierro y amonio (sal de Möhr, 0,025N). El punto final de la valoración se observa con un marcado cambio de color de azul verdoso a marrón rojizo, aunque el azul verdoso puede volver a aparecer pasados unos minutos.

La disolución sal de Möhr debe ser estandarizada a diario frente a una disolución patrón de dicromato potásico de la siguiente forma: tomar 5mL de agua destilada en un tubo de ensayo, añadiéndose los reactivos en las cantidades especificadas anteriormente.

El volumen obtenido en la valoración con la sal de Möhr se introduce en la siguiente fórmula para calcular el dato de DQO. Se expresan en mg de O<sub>2</sub>, necesarios para oxidar un litro de muestra (mg.L<sup>-1</sup>).

$$DQO \text{ en mg de } O_2/L = \frac{(A - B) * M * 8000 * Fd}{ml \text{ de muestra}}$$

Donde,

A: Volumen de sal de Möhr utilizados para el Blanco

B: Volumen de sal de Möhr obtenido en la valoración de la muestra

M: La molaridad de la sal de Möhr,

8000: La constante de equivalencia

mL de muestra: Volumen de muestra analizada.

Fd: Factor de dilución

#### **4.3.5. Determinación de la Alcalinidad Total y Soluble (APHA, 1992)**

La medición de la alcalinidad sirve para fijar los parámetros de tratamiento químico del agua, así como para ayudarnos al control de la corrosión y la incrustación en los sistemas que se utiliza agua como materia prima o en su proceso.

Este método es aplicable para la determinación de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, en aguas naturales, domesticas, industriales y residuales, aunque también puede incluir boratos, fosfatos y otras bases presentes.

##### **4.3.5.1. Alcalinidad Total**

Para su análisis se recogen 25 mL de la muestra, a los que se le añade 100 mL de agua destilada en un Elenmeyer. Se realiza una valoración de ácido clorhídrico 0,1N. Se mide el pH de la muestra en un inicio, debiendo estar cercano a la neutralidad. A medida que se añade el ácido fuerte el pH va bajando hasta que llega a pH 4, donde se para la valoración y se anota el volumen de ácido utilizado indicado en la bureta desde la que se añade el ácido.



*Ilustración 41. Alcalinidad Total*





*Ilustración 42. Valoración Alcalinidad*

La alcalinidad se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Alcalinidad} \left( \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}} \right) = \frac{Vt * N * 50000}{\text{ml de muestra}}$$

Donde,

Vt: Volumen de disolución de HCl gastado en la valoración (mL),

N: Normalidad del ácido estándar utilizado,

ml de muestra: Volumen de muestra utilizado (mL)

50000: Es una constante de equivalencia.

Los resultados son expresados como  $\text{mg.L}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$  o acético.

#### **4.3.5.2. Alcalinidad Soluble**

Se realiza de la misma manera que el proceso anterior, pero con la salvedad de filtrar o centrifugar la muestra en un inicio. Los 25 mL de muestra inicial junto con los 100 mL de agua destilada, son filtrados en una bomba de vacío con un filtro de  $0,7 \mu\text{m}$  de diámetro de poro. Con la filtración se consigue retirar los máximos sólidos posibles encontrados

en la muestra. Otra forma de retirar los sólidos de la muestra es centrifugándola durante 10 minutos a 3000 r.p.m.

Para su centrifugado se reparten los 25 mL de muestra iniciales en tubos de centrifuga, con un volumen equitativo en todos ellos. Estos tubos son centrifugados tres veces, en primera instancia con la adición de 25 mL de agua destilada, se añade 50 mL de agua en la segunda y otros 25 mL en la tercera. Entre centrífuga y centrífuga se retira el sobrenadante de los tubos a un Erlenmeyer, el cuál será objeto de nuestro análisis.

Tras el centrifugado o filtrado de la muestra, se realiza el análisis tal y como se ha explicado anteriormente, calculando el valor de alcalinidad soluble con la misma fórmula que su homónima alcalinidad total.

#### **4.3.6. Determinación de los Ácidos Grasos Volátiles (AGV) (APHA, 1992)**

Los ácidos grasos volátiles marcan el punto de estabilización, indicando un correcto funcionamiento en las cinéticas de las reacciones de producción y eliminación de estos ácidos. Los AGV son el ácido acético, propiónico, butírico, isobutírico, valérico e isovalérico.

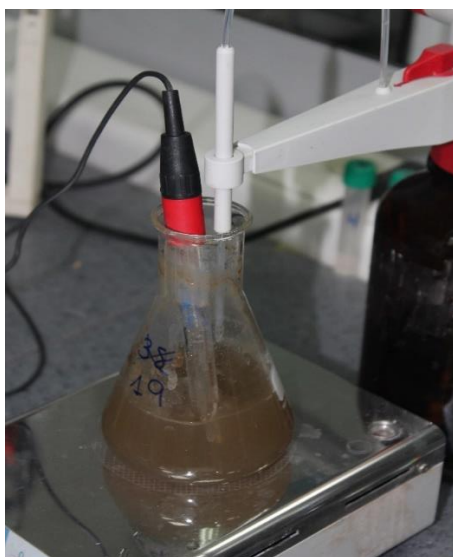
Para realizar el análisis más rápidamente se debe aprovechar el proceso anterior donde calculábamos la alcalinidad. Una vez terminado el análisis se recoge el erlenmeyer y, se pone a calentar en la placa calefactora



*Ilustración 43. Muestra en placa calefactora*

Cuando llegue al punto de ebullición y comience a hervir, se debe dejar durante tres minutos de reloj y, una vez pasados se retira el erlenmeyer de la placa y se deja enfriar a temperatura ambiente.

Una vez frío se realiza una valoración de la misma forma que en el análisis de alcalinidad, empleando esta vez una base fuerte, como es el hidróxido sódico (NaOH). Se mide el pH, bajo en sus inicios debido al ácido clorhídrico añadido en el proceso anterior, hasta llevarlo a pH 7 con la adición de la base fuerte. Tal y como se realiza en el análisis de alcalinidad, se anota el dato de volumen de base gastado en el proceso



*Ilustración 44. Valoración muestra para determinar AGV*

Los AGV se calculan con la siguiente fórmula:

$$AGV \left( \frac{mg \text{ CaCO}_3}{L} \right) = \frac{Vt * N * 50000}{ml \text{ de muestra}}$$

Donde,

Vt: Volumen de disolución de NaOH gastado en la valoración (mL),

N: Normalidad de la base estándar utilizada,

ml de muestra: Volumen de muestra utilizado (mL)

50.000: Es una constante de equivalencia.

#### 4.3.7. Producción de Biogás

La producción de biogás es un parámetro significativo de la biodegradabilidad. Los gases producidos son el producto final del metabolismo de las bacterias anaerobias (vía catabolismo). Además, el análisis de su composición, sobre todo del metano y el dióxido de carbono, nos proporcionan una medida indirecta de la actividad de las bacterias metanogénicas. En cuanto a los BMP, el volumen de biogás producido se cuantifica manualmente utilizando un transductor de presión (ifm PN 5007), tal y como se observa en la ilustración 45.



*Ilustración 45. Funcionamiento Medidor de Presión*

Para realizar la medida de presión se coloca una aguja en el medidor y se introduce en el septum del BMP reflejando la presión medida en bar, ilustración 45.

Los valores de presión son convertidos a volúmenes utilizando la ecuación de los gases ideales. El cálculo teórico basado en esta ley, funciona con la suposición de que la solubilidad del metano en el medio es despreciable. El aumento de la presión se relaciona con un aumento en el número de moles del sistema.

La producción de metano se calcula a partir de las medidas de presión de biogás y de los resultados de la composición del mismo. Se han realizado periódicamente medidas de la composición del gas. Para determinar la composición del gas se ha basado en hacer pasar el gas producido por un baño de NaOH, donde queda precipitado el CO<sub>2</sub> y por tanto el volumen medido por el contador corresponde al metano.

La producción de Biogás se calcula a partir de los datos de presión. Para calcular el volumen de Biogás producido se utiliza la siguiente fórmula:

$$V_{Biogas} = \left( \frac{V_{camara\ gas} * T}{Presion * T_{Ensayo}} \right) * \left( \frac{Presion\ medida}{mb} \right)$$

De donde;

V cámara gas: Volumen de la cámara de gas del BMP (litros)

T: Temperatura de referencia (273K)

T Ensayo: Temperatura del ensayo (K)

Presión medida: presión medida en los ensayos (mbar)

Mb: 1,101325

Con la composición del biogás, es posible cuantificar la cantidad de metano.

$$V_{metano} = V_{Biogas} * M$$

De donde;

V Biogás: El volumen de biogás que se ha obtenido anteriormente (ml)

M: Fracción molar del metano en el biogás generado.



## **Capítulo 5**

---

### **Resultados y Discusión**





## 5. Resultados y discusión

En el presente capítulo, se recogen los resultados obtenidos en los ensayos de biodegradabilidad (Biochemical Methane Potential, BMP). Los ensayos se han realizado siguiendo la metodología explicada en el capítulo de material y métodos.

Se han llevado a cabo unas series de ensayos de biodegradabilidad anaerobia.

Ensayo de **Digestión anaerobia mono-sustrato** en el que se han analizado cada uno de los residuos individualmente. De esta forma, ha sido posible conocer el potencial de producción de biogás y metano y, el porcentaje de biodegradabilidad, así como el porcentaje de eliminación de materia orgánica.

Asimismo, en este apartado se ha estudiado la complementariedad de los residuos con el lodo de depuradora, en términos de producción de metano mediante ensayos de biodegradabilidad anaerobia de **Co-digestión anaerobia de Fango mixto y residuos orgánicos**. Dada su problemática de gestión, se ha optado por estudiar la co-digestión del fango mixto de la EDAR de la cuenca sur de Sevilla “Copero” con el resto de residuos.

Además, se ha estudiado el potencial de biogás y de metano de la mezcla de diferentes residuos, mediante ensayos de biodegradabilidad anaerobia, **Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos**, con el objetivo de estudiar sustratos que enmienden el comportamiento de ciertos residuos difícilmente degradables. Del mismo modo, se ha estudiado la complementariedad de las mezclas de estos residuos con el lodo de depuradora, mediante ensayos de biodegradabilidad anaerobia, **Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica**

En este capítulo, se han reunido los resultados correspondientes a las medias analíticas relacionadas con los diferentes residuos, así como los valores de las mismas, correspondientes a las mezclas del ensayo BMP al inicio y final del test.

Puesto que la biodegradabilidad anaerobia, la producción de biogás y metano así como otros parámetros de un residuo depende de su composición, es importante conocer de antemano sus características. Entre las medidas analíticas más habituales que se realizan

junto con el ensayo BMP, se encuentran los ST y los SV, el pH, la DQO, AGV o la alcalinidad. En este caso, se ha realizado una caracterización completa.

El volumen de biogás producido en los distintos ensayos de biodegradabilidad realizados en este estudio se ha cuantificado utilizando un transductor de presión. Este método para medir la producción de biogás ha sido empleado por varios autores, como Fdez-Polanco *et al.* (2005), entre otros. Los datos de producción de biogás se han transformado en volumen de metano utilizando los valores de porcentaje de metano.

Tal y como recomiendan Angelidaki *et al.* (2009), los resultados de un test BMP se deben expresar en condiciones estándar de temperatura y presión (o STP, en sus siglas en inglés); es decir, la producción de biogás y/o metano se debe convertir a 0°C y 1 atm. Asimismo, los autores aconsejan expresar la producción específica de metano en unidades de volumen por gramo de SV, por gramo de DQO o por gramo de muestra. Por ello, y con el fin de poder realizar comparaciones entre los distintos residuos, la producción de biogás y metano se ha expresado utilizando las unidades mL CH<sub>4</sub> gSVañadido<sup>-1</sup>, donde el término gSVañadido se refiere a la cantidad de SV añadida inicialmente en los ensayos. Por otro lado, según el protocolo descrito por Angelidaki *et al.* (2009), se considera oportuno expresar la producción de gas correspondiente al inóculo (blanco o control). Por lo tanto, en este apartado se han incluido varias representaciones gráficas:

- Producción de Biogás para cada ensayo junto con la del ensayo control correspondiente.
- Productividad de Metano

## **5.1. Ensayo de Digestión anaerobia mono-sustrato de residuos orgánicos**

Con el fin de determinar la viabilidad de los residuos en una digestión anaerobia y estudiar la producción de biogás y metano y, la biodegradabilidad que presentan los residuos por separado, se han realizado diez test digestión anaerobia mono-sustrato. En todos los casos se han utilizado las mismas condiciones experimentales.

- Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Fango Mixto (EDAR Copero)
- Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Cascara Arroz (Industria Agroalimentaria)
- Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Suero Bruto (Industria láctea)
- Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Suero Ácido (Industria láctea)
- Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Alperujo (Industria fabricación aceite de oliva)
- Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Aguas de Glicerina (Industria biodiesel)
- Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con lixiviado
- Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Alpechín (Industria fabricación aceite de oliva)
- Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Aceite usado de cocina.

### **Residuos**

En la tabla 111 del anexo 1, se muestran los resultados de las analíticas de laboratorio llevadas a cabo con el fin de determinar las características de los residuos empleados en este trabajo. Con respecto a las analíticas, se ha seguido la metodología descrita en el capítulo de material y métodos 4. Como se recoge en dicha tabla, los residuos utilizados poseen unas características significativamente diferentes puesto que existe cierta variabilidad entre los resultados analíticos obtenidos para cada uno de ellos.

### **Inóculo**

Para realizar el ensayo BMP, se utilizó como fuente de biomasa metanogénica activa fango digerido extraído de los digestores de la EDAR que trata las aguas residuales

urbanas de la comarca sur de Sevilla. Su composición se muestra en la tabla 112, anexo 1.

Para las fases 2 y 3 se ha utilizado como inóculo fango adaptado procedentes de los ensayos BMP de la fase anterior. Las características analíticas se muestran en la tabla 113-114, anexo 1.

### 5.1.1. Ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con Fango Mixto (EDAR Copero)

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con fango mixto. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1**, tal y como se muestra en la tabla 2, la eliminación de materia orgánica en el lodo de depuradora es del 44%, presenta una DQO de entrada de  $23.194,20 \pm 0,77 \text{ mg L}^{-1}$  y a la salida una DQO de  $12.979,26 \pm 0,70 \text{ mg L}^{-1}$ . Por otro lado la eliminación de sólidos volátiles es del 41%. El pH y la conductividad no varían en los 21 días de ensayo.

Tabla 2. Ensayo Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

Fango Mixto				
Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$23.194,20 \pm 0,77$	$12.979,26 \pm 0,70$	44
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$21.386,30 \pm 0,85$	$14.410,40 \pm 0,90$	33
Materia Seca	%	2,14	1,44	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$13.434,05 \pm 0,89$	$7.960,02 \pm 0,84$	41
Materia Volátil	%	62,82	55,24	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,00 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,00 \pm 0,02$	$11,98 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$5.102,04 \pm 1,03$	$5.200,04 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$686,21 \pm 1,00$	$474,14 \pm 0,92$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$823,45 \pm 1,00$	$568,97 \pm 0,92$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,13	0,09	

En la **fase 2** del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con fango mixto, como se observa en la tabla 3, la materia orgánica en el lodo de depuradora, a la entrada del ensayo, tiene una DQO de  $28.479,55 \pm 0,75 \text{ mg L}^{-1}$  y a la salida un DQO de  $15.533,77 \pm 0,78 \text{ mg L}^{-1}$ . Por lo tanto, presenta una eliminación de materia orgánica del del 45%. Cuenta con una eliminación de ST y SV entorno al 50%. El pH es superior a la salida del ensayo. Sin embargo, la conductividad disminuye hasta un  $10,87 \pm 0,02 \text{ mS cm}^{-1}$ .

Tabla 3. Ensayo Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

### Fango Mixto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$28.479,55 \pm 0,75$	$15.533,77 \pm 0,78$	45
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$28.035,42 \pm 0,85$	$13.984,45 \pm 0,83$	50
Materia Seca	%	2,80	1,40	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$16.750,05 \pm 0,90$	$7.840,85 \pm 0,87$	53
Materia Volátil	%	59,75	56,06	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,38 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,00 \pm 0,02$	$10,87 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.200,10 \pm 1,04$	$7.500,18 \pm 1,03$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$518,97 \pm 0,99$	$422,07 \pm 1,04$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$622,76 \pm 0,99$	$506,48 \pm 1,04$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,12	0,06	

En la **fase 3**, tal y como se muestra en la tabla 4, del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con fango mixto, presenta una entrada de DQO de  $22.429,06 \pm 0,72 \text{ mgL}^{-1}$  y una salida de  $11.890,08 \pm 0,78 \text{ mgL}^{-1}$ . Por lo tanto, muestra una eliminación de metería orgánica del 47%. En términos de sólidos el porcentaje de eliminación de ST es del 48% y un 55% en SV.

Tabla 4. Ensayo Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

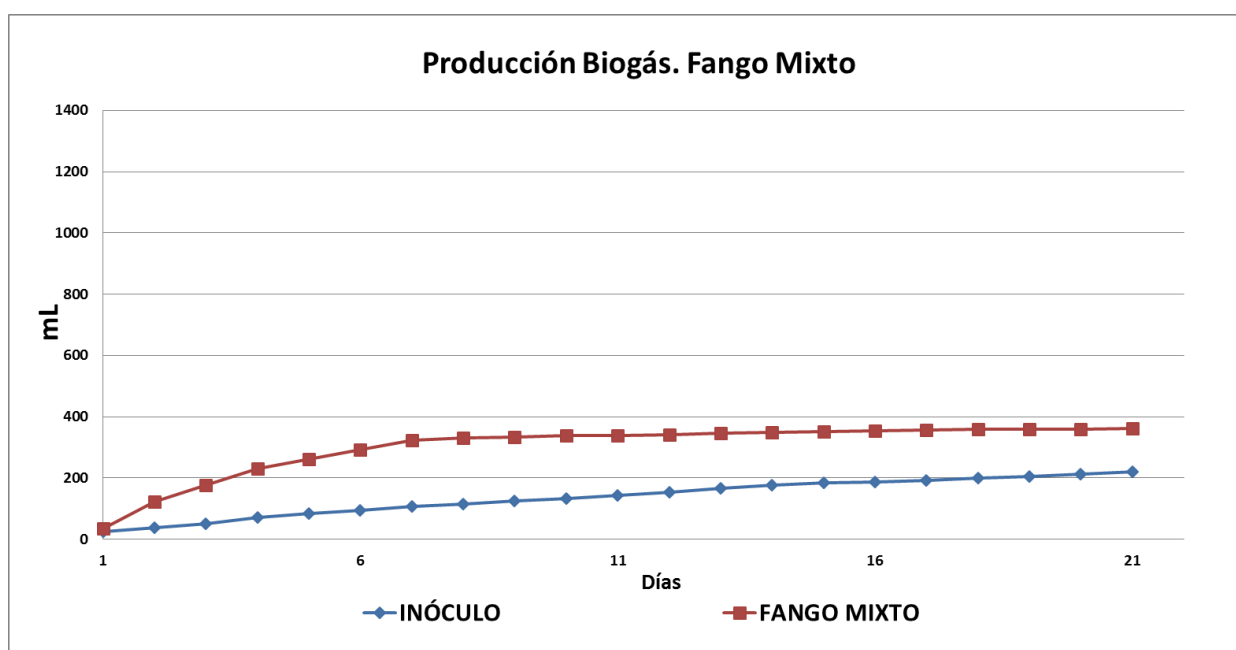
#### Fango Mixto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$22.429,06 \pm 0,72$	$11.890,08 \pm 0,78$	47
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$29.200,11 \pm 0,80$	$15.200,12 \pm 0,80$	48
Materia Seca	%	2,92	1,52	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$16.705,16 \pm 0,85$	$7.544,18 \pm 0,83$	55
Materia Volátil	%	57,21	49,63	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,00 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,19 \pm 0,02$	$11,98 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$7.300,12 \pm 1,04$	$7.200,78 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$1.060,10 \pm 1,01$	$400,15 \pm 0,99$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$1.272,08 \pm 1,01$	$510,12 \pm 0,99$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,15	0,06	

### 5.1.1.1. Producción de biogás

En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con fango mixto. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del fango mixto.

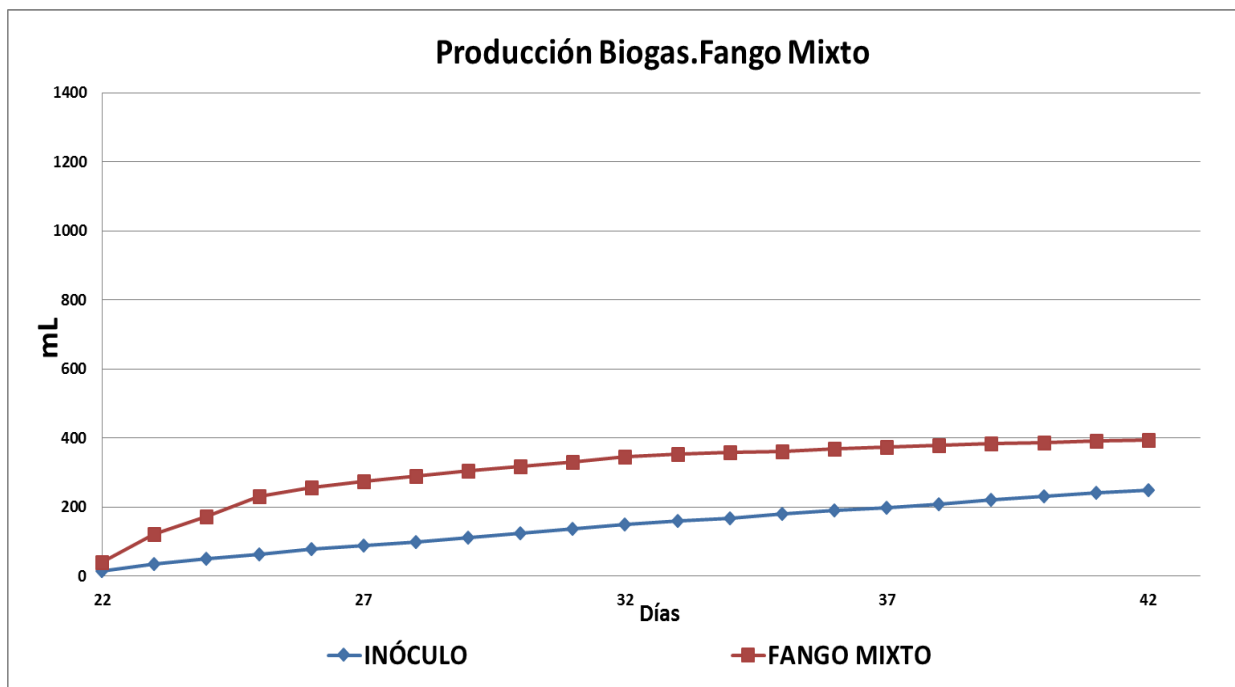
En la **fase 1**, tal y como se observa en la gráfica 1, se representa la producción de biogás que genera el fango mixto. Presenta un crecimiento hasta el día 8, en el que se estabiliza. La producción total de biogás es de 361 mL. En comparación con el inóculo (221 mL), se incrementa la producción de biogás en 140 mL.



Gráfica 1. Producción Biogás Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

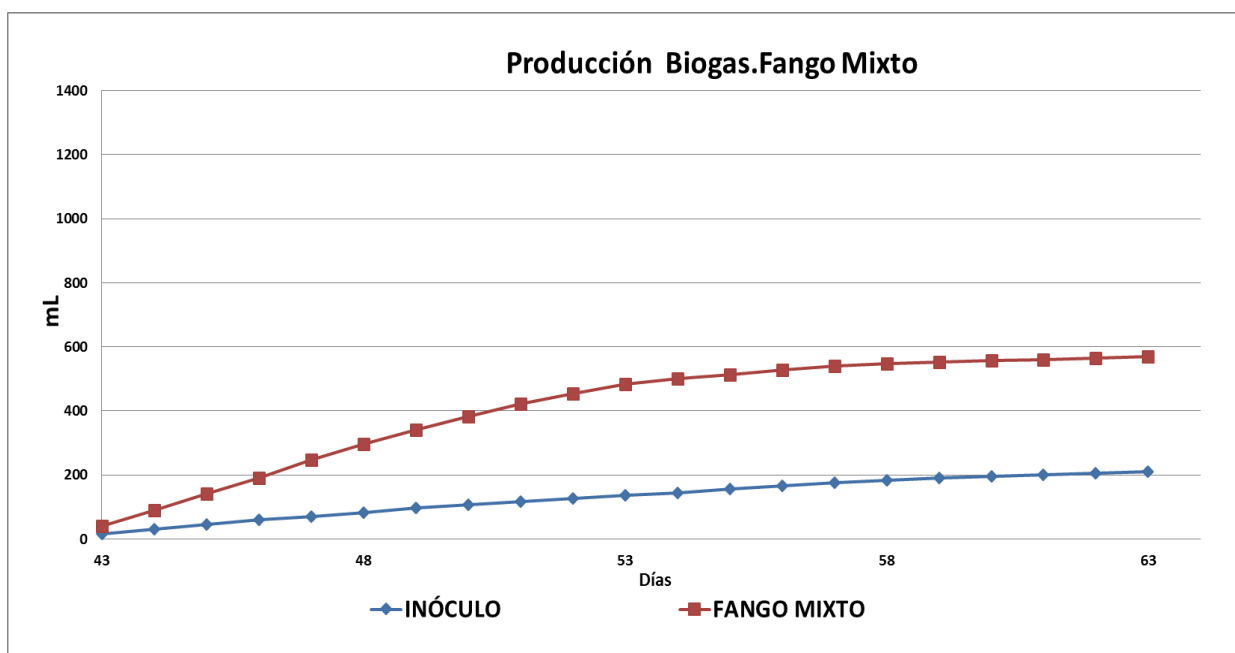
En la gráfica 2, se observa la producción de biogás que genera el fango mixto en la **fase 2**. Presenta un crecimiento hasta el día 32, a partir del cual se estabiliza, generándose un volumen total de biogás de 393 mL.





Gráfica 2. Producción Biogás Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

En la gráfica 3, se representa la producción de biogás que genera el fango mixto en la **fase 3**, presentando un crecimiento notorio hasta el día 58, en el que se estabiliza generando una producción total de biogás de 564 mL.

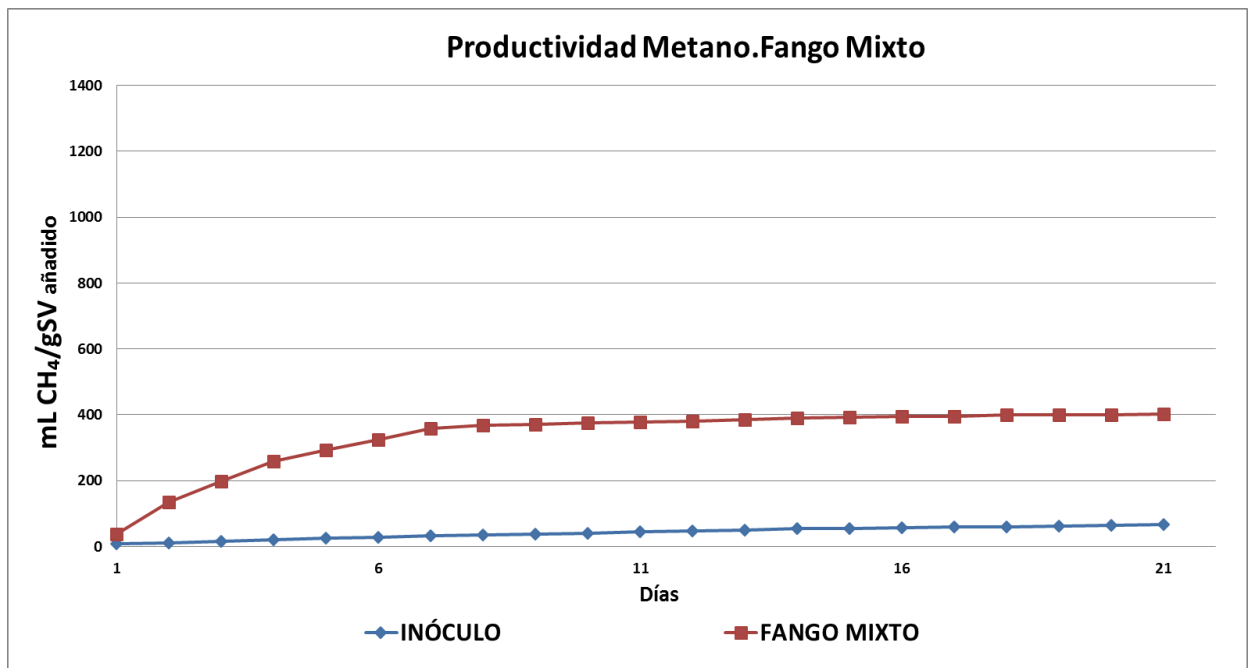


Gráfica 3. Producción Biogás Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

### 5.1.1.2. Productividad de Metano

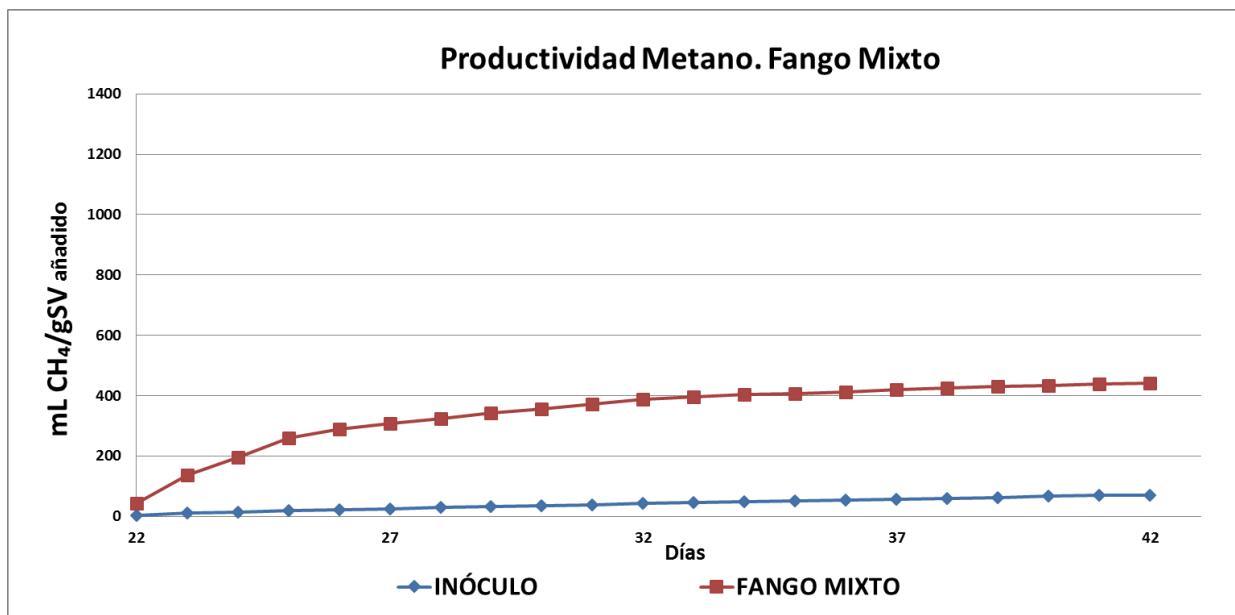
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con fango mixto, de las distintas fases temporales.

En cuanto a la productividad de metano ( $\text{mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ ) en la **fase 1**, el fango mixto aumenta significativamente la productividad de metano llegando a los  $403 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ , tal y como se observa en la gráfica 4.



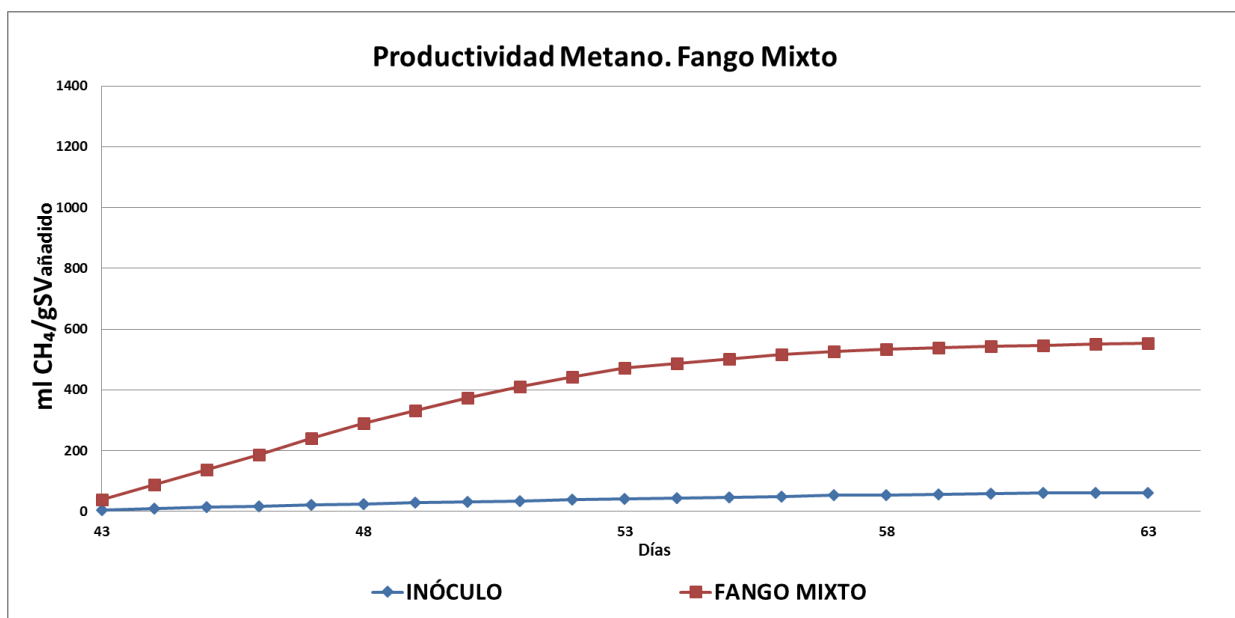
Gráfica 4. Productividad Metano Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

En la **fase 2** del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con fango mixto, como se puede observar en la gráfica 5 el lodo de depuradora aumenta elocuentemente la productividad de metano siendo de  $441 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ .



Gráfica 5. Productividad Metano Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

El fango mixto en la **fase 3** aumenta forma notoria la productividad de metano siendo de 554 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, tal y como se puede observar en la gráfica 6.



Gráfica 6. Productividad Metano Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

#### **5.1.1.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada en el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. El porcentaje de metano en el ensayo con fango mixto es del 75%, aumentando en un 20% con respecto al ensayo del inóculo (55%).

A la vista de los resultados, la adición del residuo de depuradora en una digestión anaerobia ha conducido a una mejora en la producción de biogás y en la productividad de metano, a medida que transcurren las fases temporales los dos parámetros aumentan. Es decir una vez que los microorganismos se han adaptado al residuo, va incrementando la producción de biogás.

### 5.1.2. Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Cascara Arroz (Industria Agroalimentaria)

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con cascara de arroz. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1**, como se puede observar en la tabla 5, la cascara de arroz presenta una eliminación de DQO por encima del 50%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 38% y, el de sólidos volátiles presenta una eliminación del 33%. El pH no varía durante los 21 días del ensayo.

Tabla 5. Ensayo Cascara Arroz. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

#### Cascara de Arroz

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	26.074,88 ±0,74	11.381,33 ±0,78	56
ST	mg L <sup>-1</sup>	25.866,54 ±0,85	16.105,42 ±0,81	38
Materia Seca	%	2,59	1,44	
SV	mg L <sup>-1</sup>	16.136,75 ±0,90	10.770,21 ±0,88	33
Materia Volátil	%	62,38	55,24	
pH		7,00 ±0,01	7,00 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	12,28 ±0,02	12,20 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	5.918,37 ±1,03	6.400,36 ±1,00	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	508,62 ±0,96	258,52 ±1,03	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	610,34 ±0,96	310,34 ±1,03	
Relación AGV/Alcalinidad		0,09	0,04	

En la tabla 6, se observa los resultados analíticos de la **fase 2**. La cascara de arroz presenta una eliminación de DQO del 45%. Aunque el porcentaje de eliminación de sólidos es superior, siendo en sólidos totales del 53% y, el de sólidos volátiles del 56%. El pH se ve aumentado durante el ensayo hasta un  $7,32 \pm 0,01$ . Cabe destacar que la relación AGV/Alcalinidad aumenta de 0,04 a 0,05.

Tabla 6. Ensayo Cascara Arroz. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

#### Cascara Arroz

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	24.356,41 $\pm$ 0,77	13.408,33 $\pm$ 0,75	45
ST	mg L <sup>-1</sup>	34.230,45 $\pm$ 0,80	15.968,02 $\pm$ 0,82	53
Materia Seca	%	3,42	1,60	
SV	mg L <sup>-1</sup>	23.600,10 $\pm$ 0,86	10.400,33 $\pm$ 0,88	56
Materia Volátil	%	68,95	65,13	
pH		7,00 $\pm$ 0,01	7,32 $\pm$ 0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	12,28 $\pm$ 0,02	13,04 $\pm$ 0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	5.200,15 $\pm$ 1,08	6.800,25 $\pm$ 1,05	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	207,93 $\pm$ 1,03	317,41 $\pm$ 0,99	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	249,52 $\pm$ 1,03	380,90 $\pm$ 0,99	
Relación AGV/Alcalinidad		0,04	0,05	

En la **fase 3**, tal y como se observa en la tabla 7, La cascara de arroz presenta una eliminación de DQO del 44%. Aunque el porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 43%, los sólidos volátiles presenta una eliminación del 40%. El pH se mantiene igual durante los días que dura el ensayo. Con respecto a la alcalinidad, ésta disminuye. Cabe destacar un aumento del 4% en el porcentaje de materia volátil a la salida, 64,83.

Tabla 7. Ensayo Cascara Arroz. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

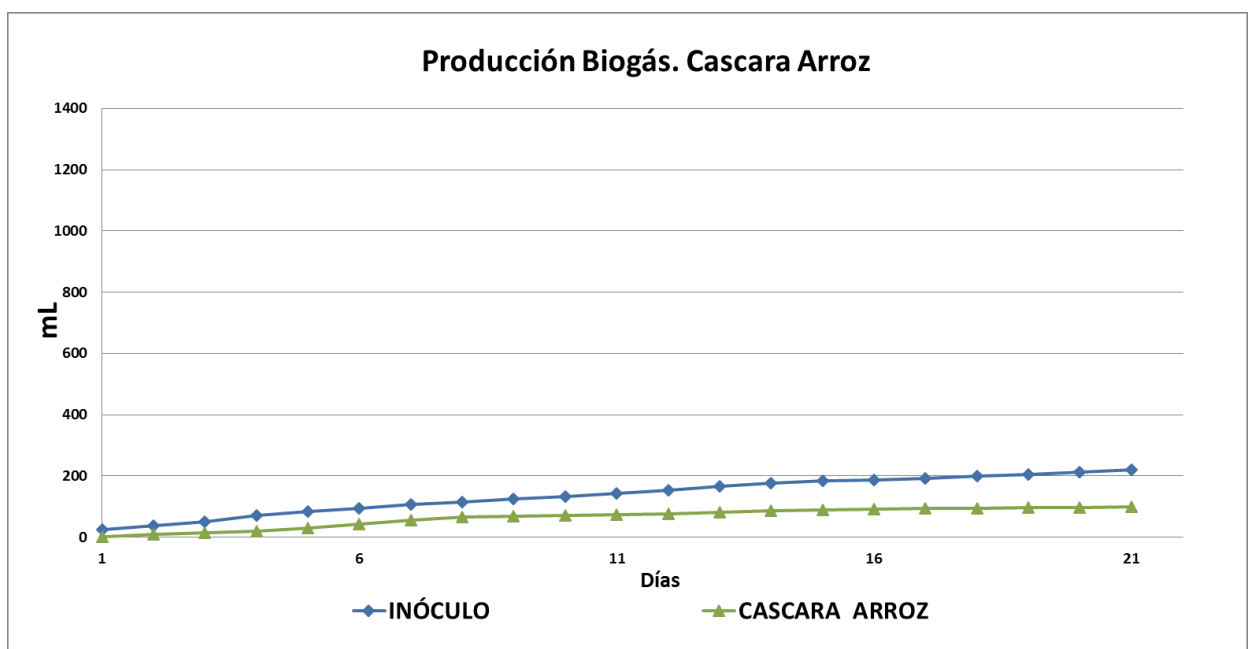
#### Cascara Arroz

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	20.145,22 ±0,78	11.230,13 ±0,75	44
ST	mg L <sup>-1</sup>	27.845,01 ±0,80	15.780,15 ±0,88	43
Materia Seca	%	2,78	1,58	
SV	mg L <sup>-1</sup>	16.955,52 ±0,90	10.230,09 ±0,85	40
Materia Volátil	%	60,89	64,83	
pH		7,00 ±0,01	7,00 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	12,48 ±0,02	12,20 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	8.500,08 ±1,04	6.780,07 ±1,02	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	388,10 ±0,99	320,41 ±1,03	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	465,12 ±0,99	390,07 ±1,03	
Relación AGV/Alcalinidad		0,05	0,05	

### 5.1.2.1. Producción de biogás

En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con cascara de arroz. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva de la cascara de arroz.

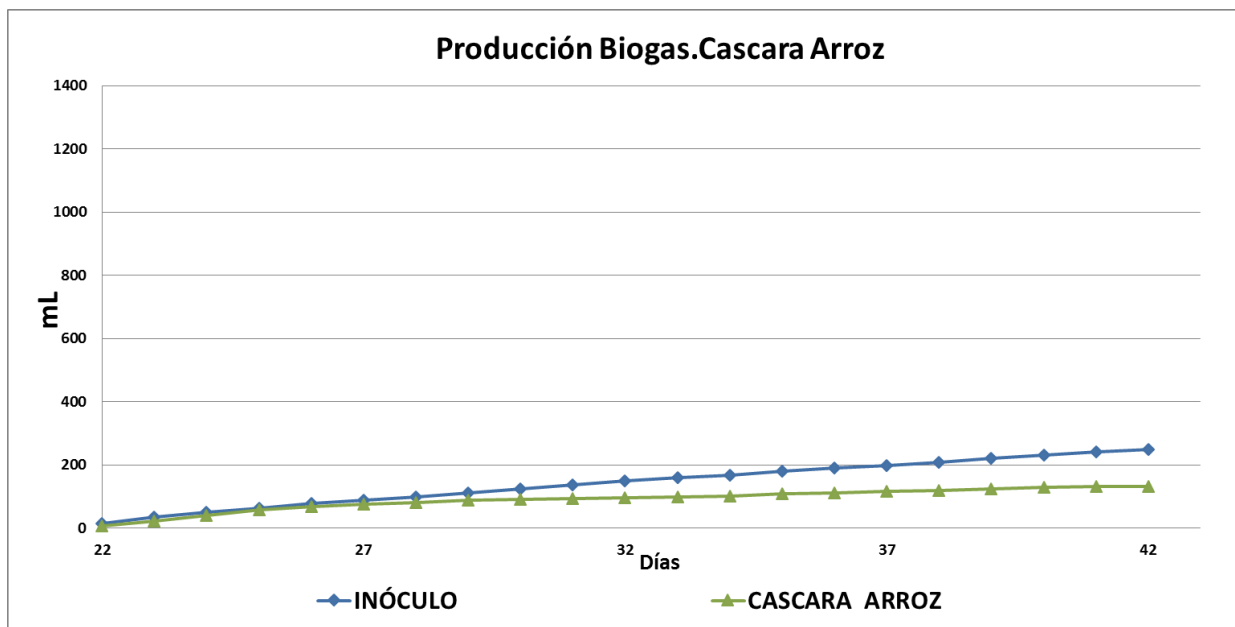
En la fase 1 como se representa en la gráfica 7, la adición de la cáscara de arroz no aumenta la producción de biogás. El inóculo produce 122 mL de biogás más que la cascara de arroz que tan solo produce 99 mL.



Gráfica 7. Producción de Biogás Cascara Arroz. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

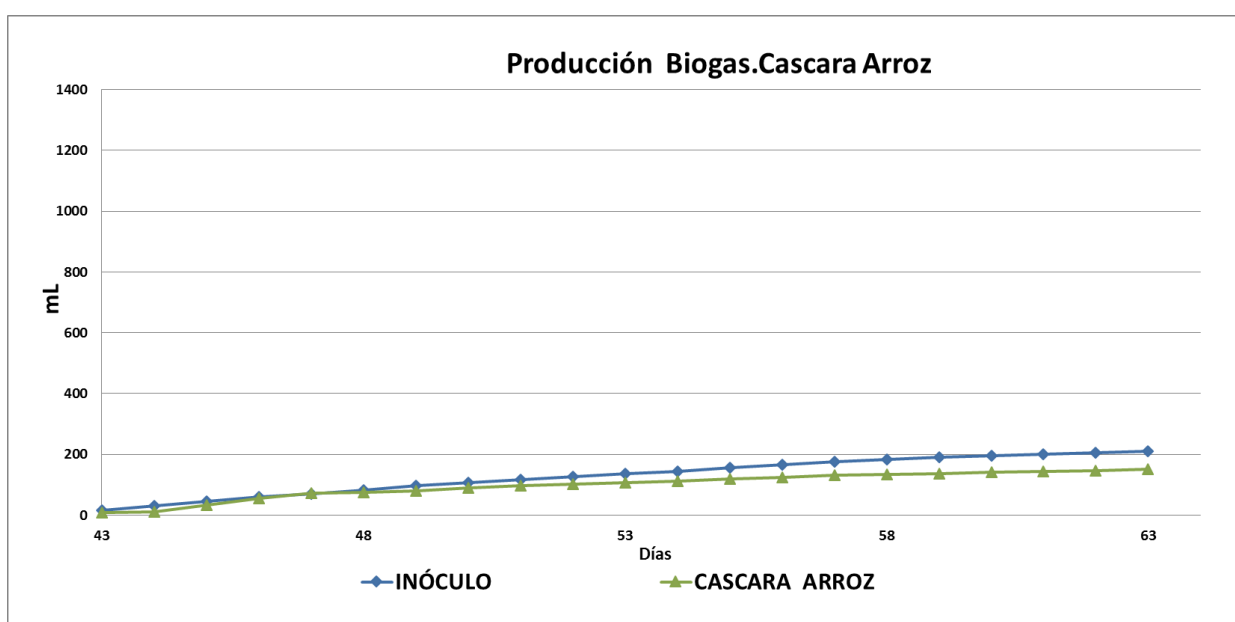
En la **fase 2**, tal y como se representa en la gráfica 8. Del día 22 al 27, la cascara de arroz presenta un crecimiento similar al inóculo. A partir del día 27, la producción de biogás de la cascara de arroz se estabiliza. La adición de la cáscara de arroz no aumenta la producción de biogás. El inóculo produce 118 mL de biogás más que la cascara de arroz que tan solo produce 131 mL.





Gráfica 8. Producción Biogás Cascara Arroz. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

Como se representa en la gráfica 9 respecto a la **fase 3**, del día 43 al 50, la cascara de arroz presenta un crecimiento similar al inóculo. A partir del día 50, la producción de biogás de la cascara de arroz se estabiliza. La adición de la cáscara de arroz no aumenta la producción de biogás. El inóculo produce 58 mL de biogás más que la cascara de arroz que, tan solo produce 151 mL.

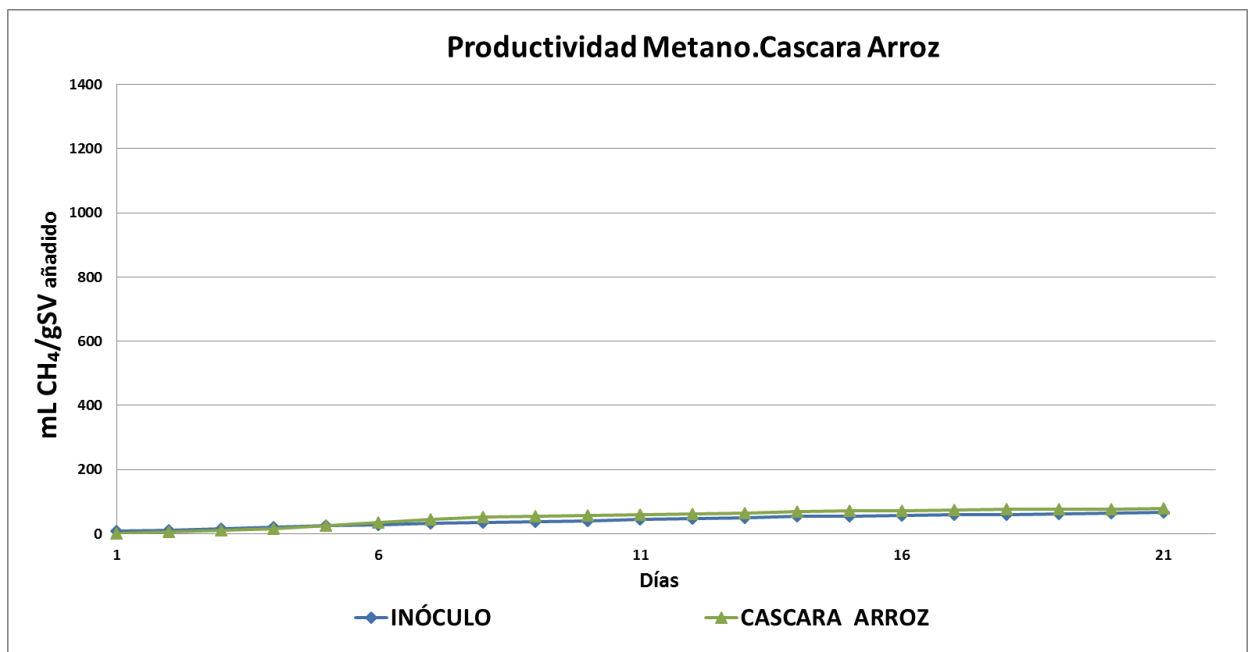


Gráfica 9. Producción Biogás Cascara Arroz. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

### 5.1.2.2. Productividad de Metano

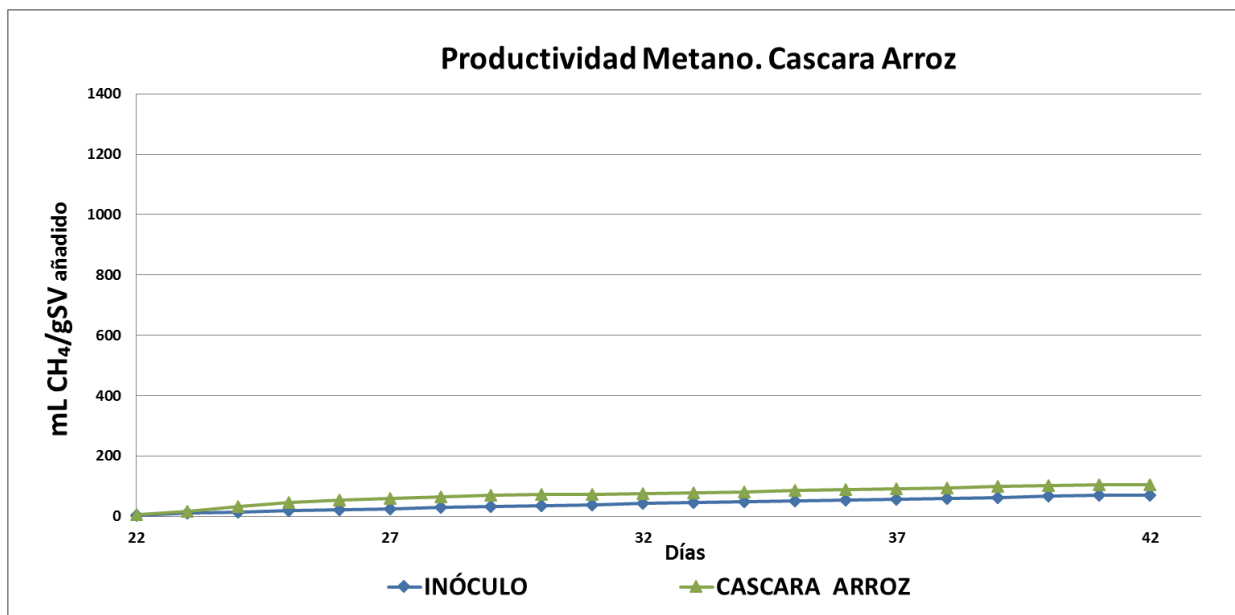
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con cascara de arroz, de las distintas fases temporales.

Con respecto a la productividad de metano en la **fase 1**, el inóculo produce un total de 67 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> y la cascara de arroz 79 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>. Tal y como se representa en la gráfica 10.



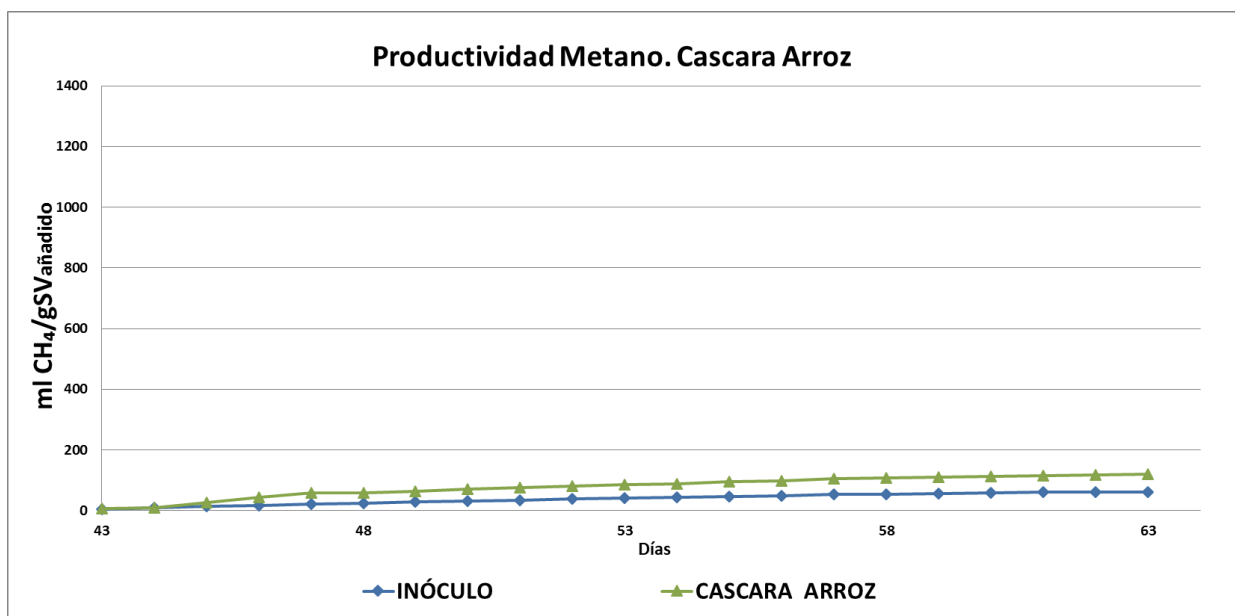
Gráfica 10. Productividad Metano Cascara Arroz. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

En la **fase 2**, tal y como se representa en la gráfica 11. El inóculo produce un total de 71 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> y la cascara de arroz 105 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 11. Productividad Metano Cascara Arroz. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

La productividad de metano en la **fase 3**, el ensayo del inóculo produce un total de 62 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> y, la cascara de arroz 120 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.tal y como se representa en la gráfica 12.



Gráfica 12.Productividad Metano Cascara Arroz Digestión anaerobia mono-sustrato. Fase 3

### **5.1.2.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. El porcentaje de metano en el ensayo con cascara de arroz es del 68%, aumentando en un 13% con respecto al ensayo del inóculo (55%).

A la vista de los resultados, la adición de la cáscara de arroz, en una digestión anaerobia no mejora en la producción de biogás y en la productividad de metano, debido a que es un residuo difícil de asimilar. Esto sugiere que la hidrólisis es lenta y poco a poco va mejorando el rendimiento, cuando va avanzando ésta

### 5.1.3. Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Suero Bruto (Industria láctea)

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con suero bruto. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1** como se muestra en la tabla 8, se observa que el suero bruto presenta una eliminación de materia orgánica del 52%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 23%. Sin embargo, los sólidos volátiles presentan un porcentaje de eliminación superior, llegando al 32%. La relación AGV/ Alcalinidad disminuye de un 0.13 a un 0.07.

Tabla 8. Ensayo Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

Suero Bruto				
Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	25.772,11 ±0,77	12.433,58 ±0,74	52
ST	mg L <sup>-1</sup>	20.892,74 ±0,89	16.055,69 ±0,85	23
Materia Seca	%	2,09	1,61	
SV	mg L <sup>-1</sup>	13.442,45 ±0,90	9.140,84 ±0,86	32
Materia Volátil	%	64,34	56,93	
pH		7,00 ±0,01	7,10 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	17,57 ±0,02	17,50 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	5.102,04 ±1,00	4.100,27 ±1,02	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	682,76 ±1,02	298,28 ±1,04	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	819,34 ±1,02	357,93 ±1,04	
Relación AGV/Alcalinidad		0,13	0,07	

En la tabla 9 se muestra los resultados analíticos de la **fase 2**, se observa que el suero bruto presenta una eliminación de DQO del 56%. Aunque el porcentaje en eliminación de sólidos totales es del 26%, el de sólidos volátiles presenta una eliminación del 37%. La relación AGV/ Alcalinidad, disminuye de un 0.12 a un 0.05. Cabe destacar la disminución en la conductividad al finalizar el ensayo ( $13,10 \pm 0,02$ ). El pH aumenta de  $7,00 \pm 0,01$  a  $7,33 \pm 0,01$ .

Tabla 9. Ensayo Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

### Suero Bruto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	26.404,45 $\pm$ 0,74	11.731,15 $\pm$ 0,78	56
ST	mg L <sup>-1</sup>	21.750,87 $\pm$ 0,82	16.120,12 $\pm$ 0,80	26
Materia Seca	%	2,18	1,61	
SV	mg L <sup>-1</sup>	14.550,41 $\pm$ 0,85	9.180,35 $\pm$ 0,88	37
Materia Volátil	%	64,28	56,95	
pH		7,00 $\pm$ 0,01	7,33 $\pm$ 0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	17,57 $\pm$ 0,02	13,10 $\pm$ 0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	4.285,87 $\pm$ 1,00	6.400,96 $\pm$ 1,01	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	518,97 $\pm$ 0,95	291,38 $\pm$ 1,00	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	622,76 $\pm$ 0,95	349,66 $\pm$ 1,00	
Relación AGV/Alcalinidad		0,12	0,05	

En la **fase 3**, tal y como se observa en la tabla 10. El suero bruto presenta una eliminación de materia orgánica del 54% y, el porcentaje de eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es parejo, siendo un 45%. La relación AGV/ alcalinidad, disminuye de un 0.18 a un 0.05.

Tabla 10. Ensayo Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

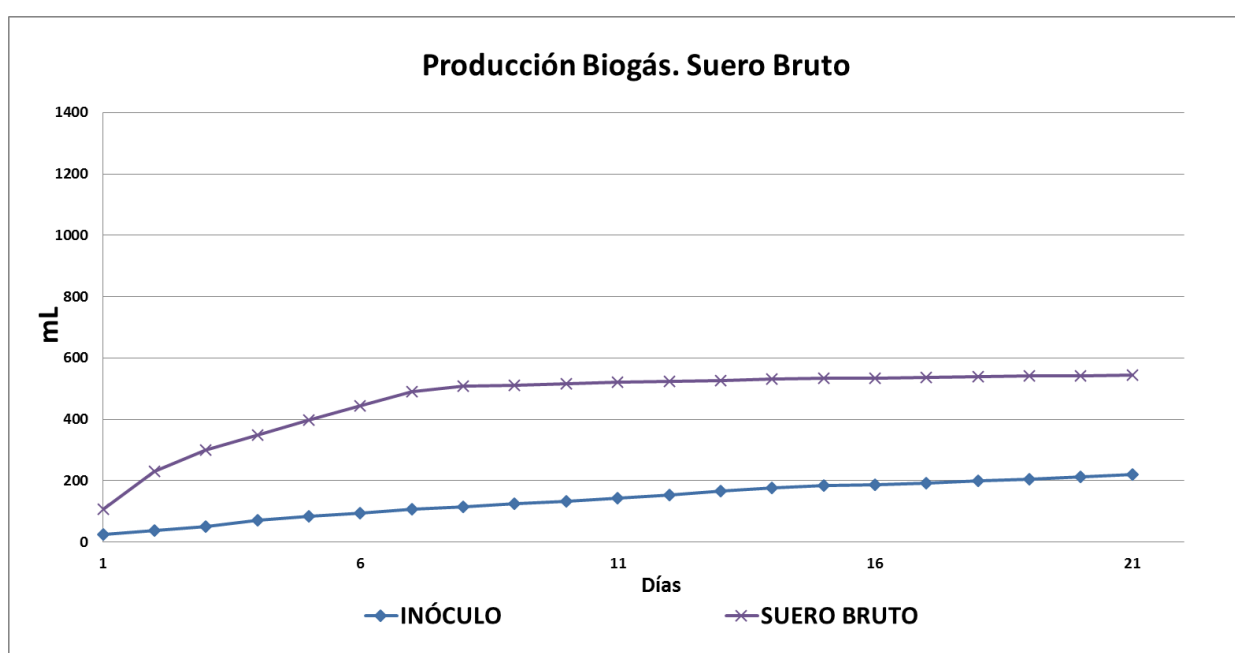
### Suero Bruto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	26.855,45 ±0,77	12.230,12 ±0,80	54
ST	mg L <sup>-1</sup>	24.987,08 ±0,80	13.860,41 ±0,90	45
Materia Seca	%	2,50	1,39	
SV	mg L <sup>-1</sup>	16.875,03 ±0,82	9.210,07 ±0,85	45
Materia Volátil	%	67,54	66,45	
pH		7,00 ±0,01	7,10 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	12,50 ±0,02	12,50 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	5140,41 ±1,02	6.120,87 ±1,05	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	900,48 ±0,98	300,32 ±1,03	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	1.080,12 ±0,98	350,56 ±1,03	
Relación AGV/Alcalinidad		0,18	0,05	

### 5.1.3.1. Producción de biogás

En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con suero bruto. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del suero bruto.

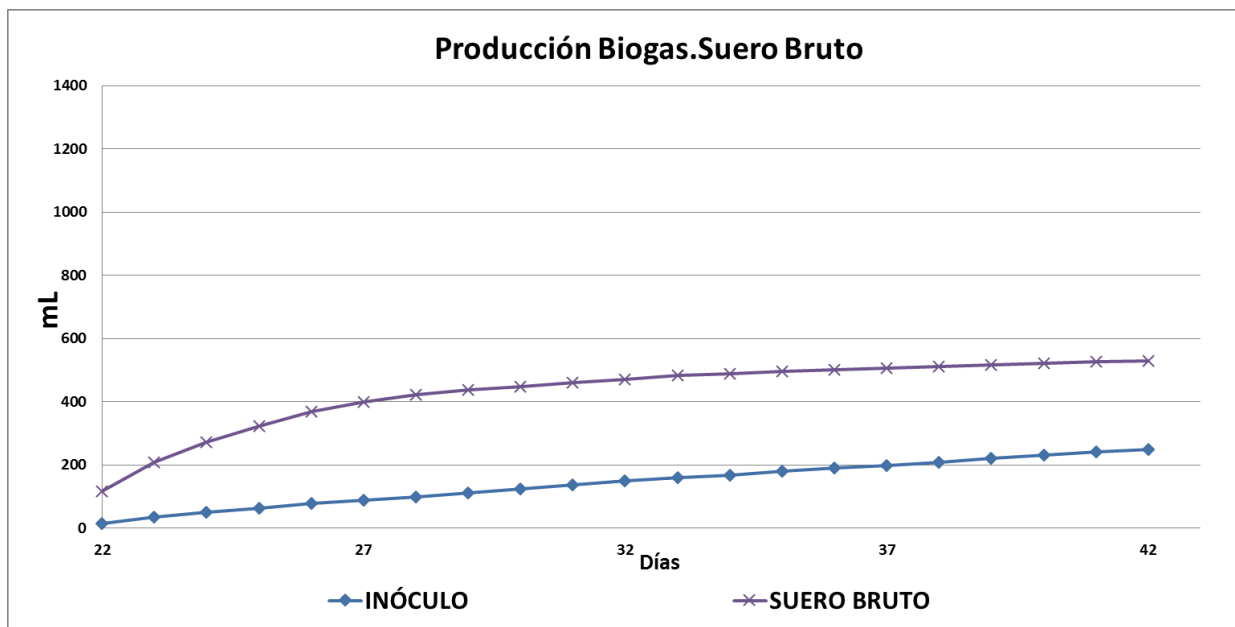
En la gráfica 13 se representa la producción de biogás de la **fase 1**, la adición de suero bruto presenta un crecimiento exponencial hasta el día 7, en el cual se estabiliza, generando una producción total de 544 mL. Con respecto al inóculo (221 mL), el suero bruto (544 mL) incrementa la producción de biogás en 323 mL.



Gráfica 13. Producción de Biogás Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase I

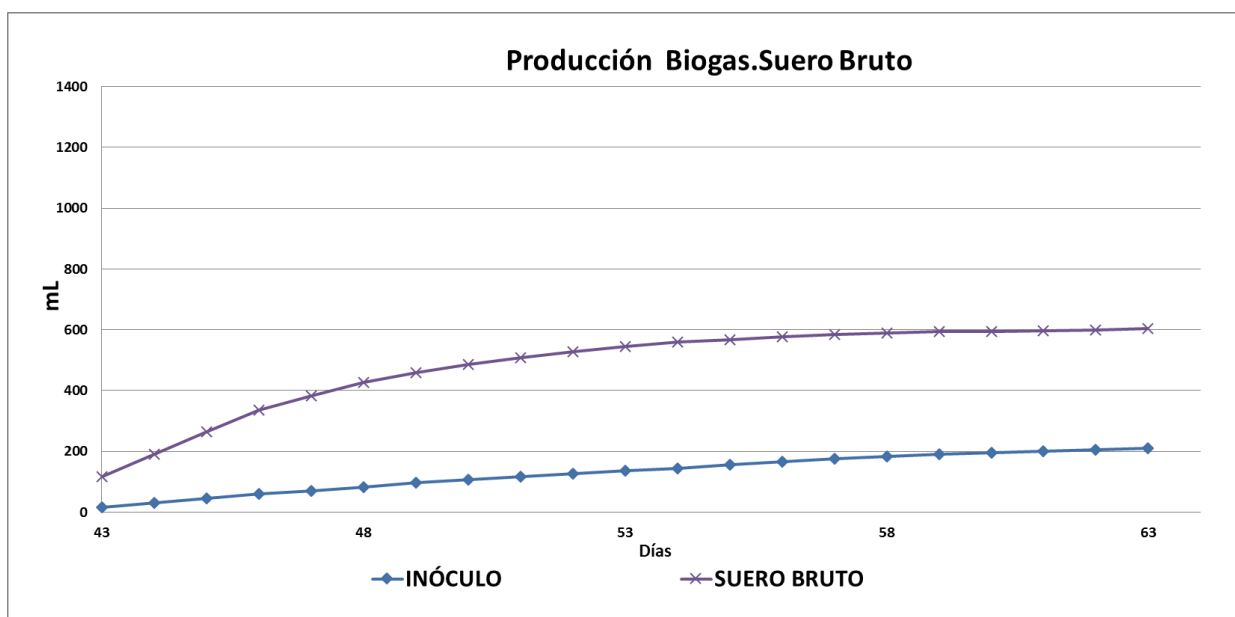
Como se observa en la gráfica 14 de la **fase 2** del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con suero bruto. La producción de biogás presenta un crecimiento exponencial hasta el día 27, en el cual se estabiliza, generando una producción total de 528 mL. Con respecto al inóculo (249 mL), el suero bruto (528 mL) incrementa la producción de biogás en 279 mL.





Gráfica 14. Producción Biogás Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

La producción de biogás en la **fase 3**, presenta un crecimiento exponencial hasta el día 47 en el cual se estabiliza, generando una producción total es de 603 mL. Con respecto al inóculo (209 mL), el suero bruto incrementa la producción de biogás en 394 mL, tal y como se muestra en la gráfica 15.

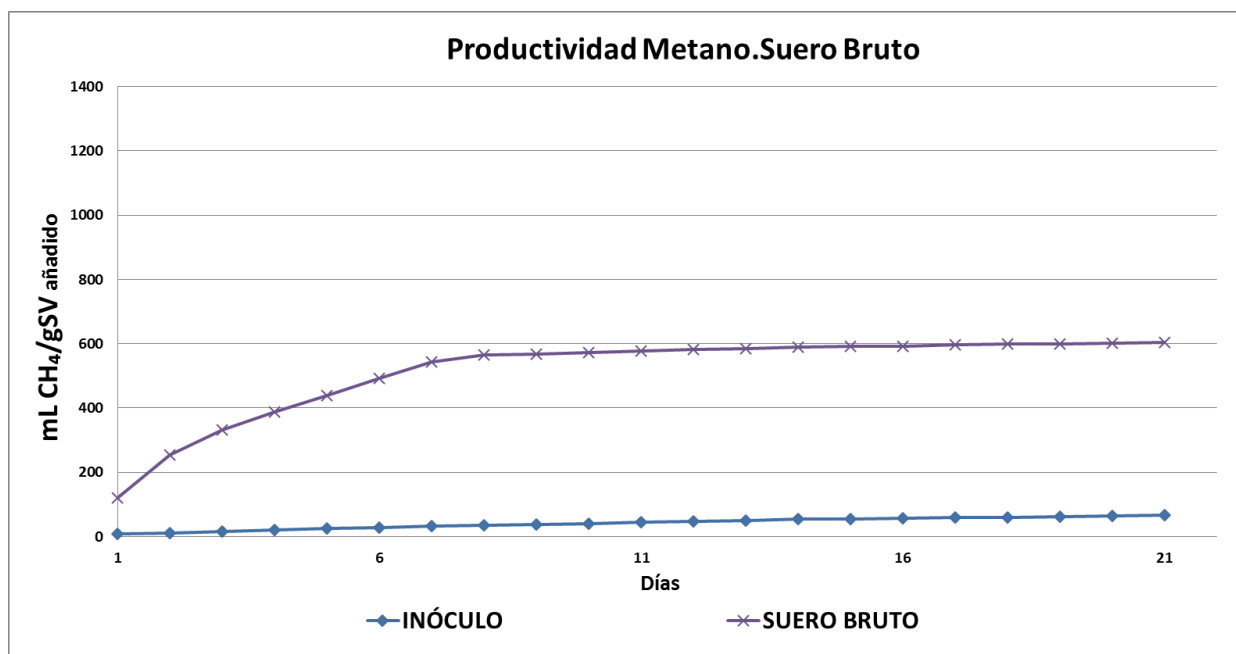


Gráfica 15. Producción Biogás Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

### 5.1.3.2. Productividad de Metano

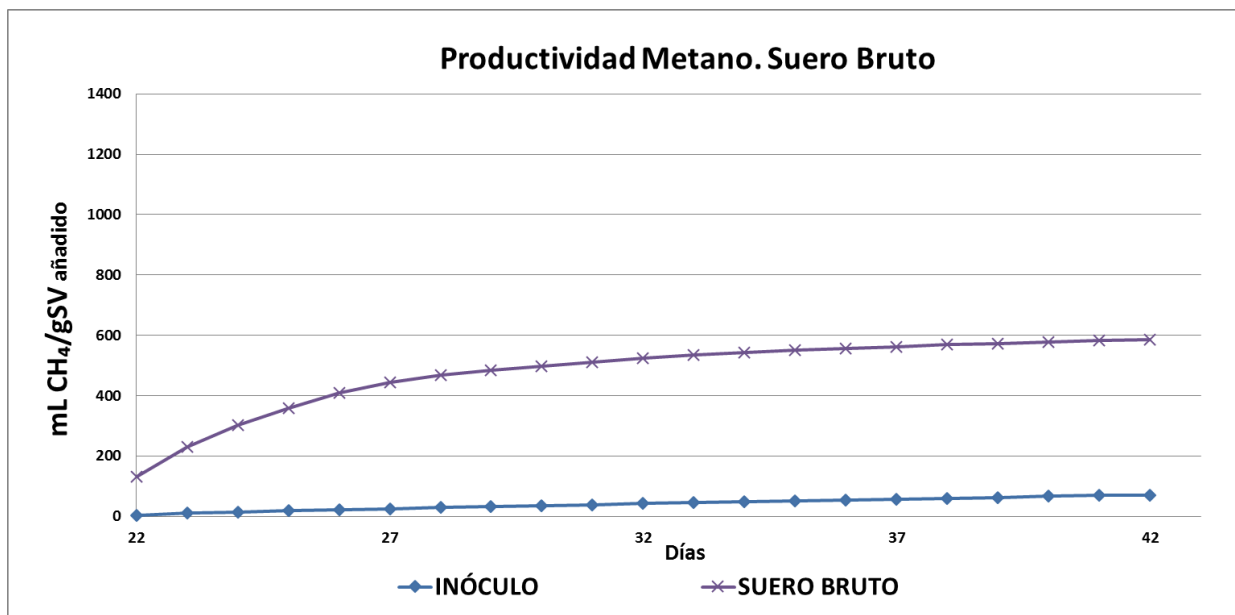
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con suero bruto, de las distintas fases temporales.

En la **fase1**, Como se observa en la gráfica 16. La productividad de metano en el suero bruto, 604 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, es muy superior a la del inóculo (67 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).



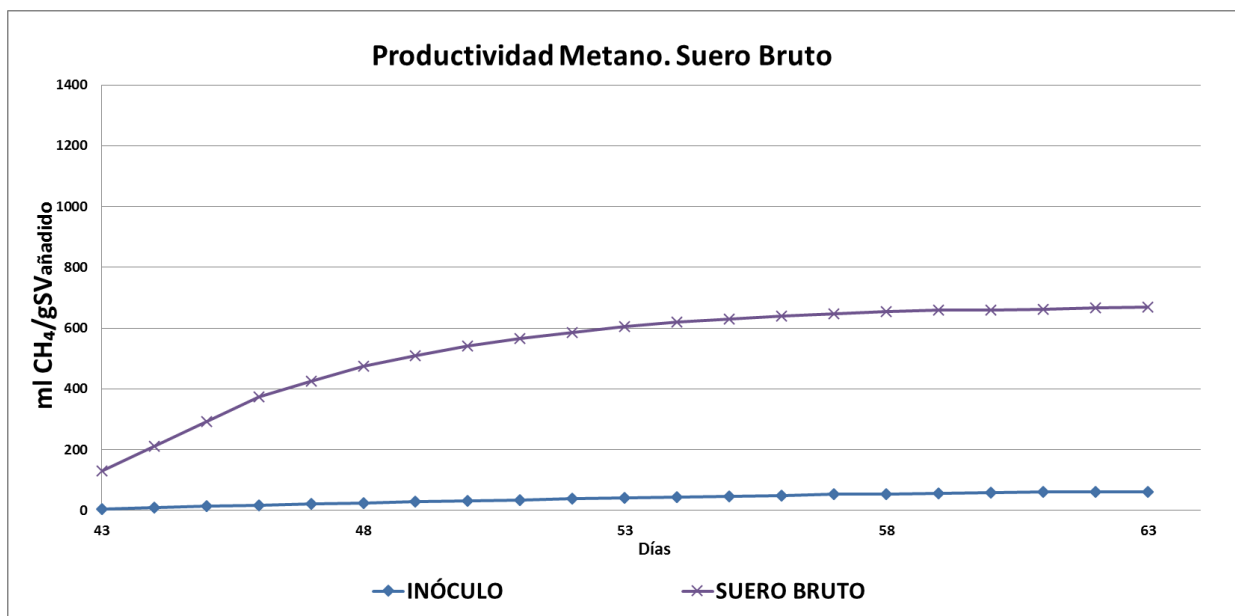
Gráfica 16. Productividad de Metano Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

En la **fase 2**, la productividad de metano en el suero bruto, 586 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, es superior a la del inóculo (71 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>). Tal y como se observa en la gráfica 17.



Gráfica 17. Productividad Metano Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

En la **fase 3**, como se representa en la gráfica 18. La productividad de metano en el suero bruto 669 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, es significativamente superior a la del inóculo (62 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).



Gráfica 18. Productividad Metano Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

#### **5.1.3.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. El porcentaje de metano en el ensayo con suero bruto es del 75%, aumentando en un 20% con respecto al ensayo del inóculo (55%).

A la vista de los resultados, la adición del residuo de la industria láctea (suero bruto) en una digestión anaerobia ha conducido a una mejora significativa en la producción de biogás y en la productividad de metano, así como el porcentaje de metano en el biogás.

#### 5.1.4. Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Suero Ácido (Industria láctea)

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con suero ácido. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1**, tal y como se muestra en la tabla 11. El porcentaje de eliminación de materia orgánica en el caso del suero ácido es del 60%. La eliminación de los sólidos tanto el total como el volátil, son iguales, un 34%. El pH final es de  $7,50 \pm 0,01$  y, la relación final AGV/ Alcalinidad es 0,03.

Tabla 11. Ensayo Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1  
Suero Ácido

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	26.013,32 ±0,78	10.500,35 ±0,75	60
ST	mg L <sup>-1</sup>	21.944,85 ±0,85	14.580,04 ±0,90	34
Materia Seca	%	2,19	1,46	
SV	mg L <sup>-1</sup>	12.058,74 ±0,80	7.910,78 ±0,85	34
Materia Volátil	%	54,95	54,25	
pH		7,00 ±0,01	7,50 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	12,00 ±0,02	12,10 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	5.122,45 ±1,03	5.200,22 ±1,04	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	762,07 ±1,02	146,55 ±0,90	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	914,48 ±1,02	175,86 ±0,90	
Relación AGV/Alcalinidad		0,15	0,03	

En la tabla 12, se muestran los resultados analíticos de la **fase 2** del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con suero ácido, se puede observar que el porcentaje de eliminación de DQO en el caso del suero ácido es del 54%. La eliminación de los sólidos totales y volátiles es del 41% y 49% respectivamente. El pH final es de  $7,31 \pm 0,01$ , y, la relación AGV/ Alcalinidad es 0,03.

Tabla 12. Ensayo Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

### Suero Ácido

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	27.101,41 ±0,70	12.488,52 ±0,72	54
ST	mg L <sup>-1</sup>	24.620,89 ±0,80	14.600,63 ±0,80	41
Materia Seca	%	2,46	1,46	
SV	mg L <sup>-1</sup>	15.825,55 ±0,85	8.010,95 ±0,90	49
Materia Volátil	%	64,28	54,86	
pH		7,00 ±0,01	7,31 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	12,00 ±0,02	10,96 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	4.600,02 ±1,02	6.400,45 ±1,03	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	724,12 ±0,90	197,24 ±1,03	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	868,97 ±0,90	236,69 ±1,03	
Relación AGV/Alcalinidad		0,16	0,03	

En la **fase 3**, tal y como se observa en la tabla 13. El porcentaje de eliminación de DQO. En el caso del suero ácido es del 53%. La eliminación de los sólidos totales y volátiles es del 42% y 51% respectivamente. El pH final es de  $7,50 \pm 0,01$  y, la relación AGV/alcalinidad es 0,03.

Tabla 13. Ensayo Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

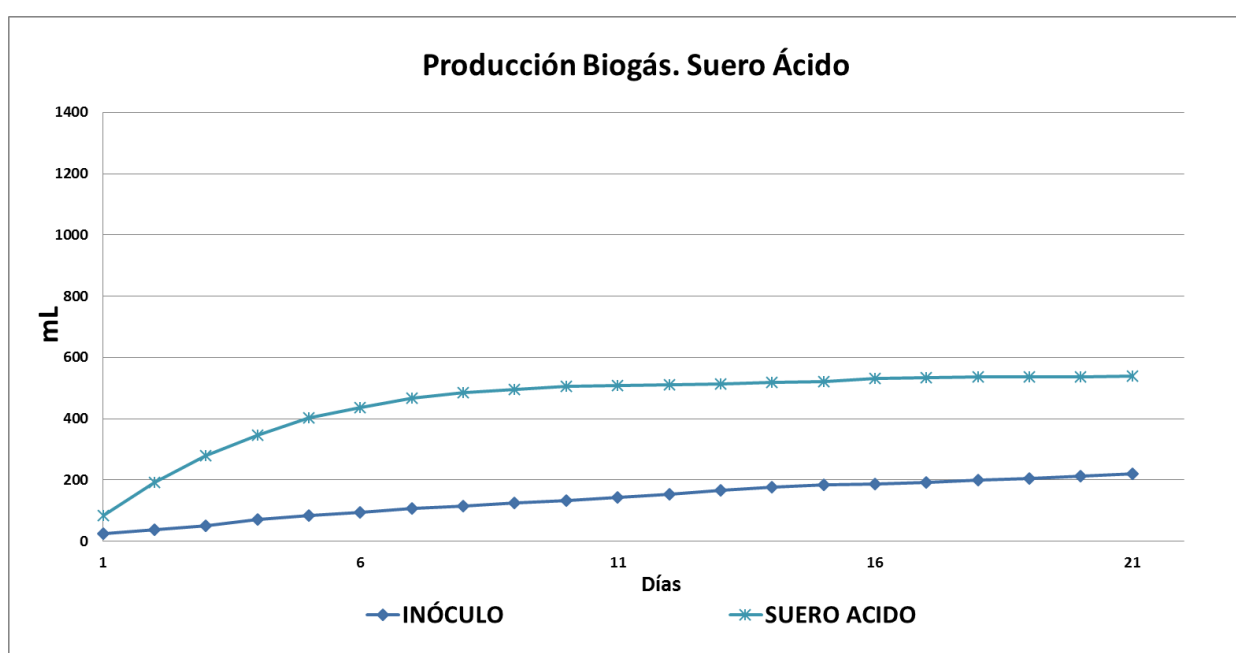
### Suero Ácido

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	27.261,01 $\pm$ 0,75	12.810,15 $\pm$ 0,79	53
ST	mg L <sup>-1</sup>	24.598,12 $\pm$ 0,80	14.325,32 $\pm$ 0,89	42
Materia Seca	%	2,46	1,43	
SV	mg L <sup>-1</sup>	15.984,45 $\pm$ 0,90	7.860,03 $\pm$ 0,88	51
Materia Volátil	%	64,98	54,87	
pH		7,00 $\pm$ 0,01	7,50 $\pm$ 0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	12,30 $\pm$ 0,02	12,10 $\pm$ 0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	4.900,04 $\pm$ 1,04	6.345,88 $\pm$ 1,00	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	1.440,05 $\pm$ 0,90	200,13 $\pm$ 1,03	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	1.728,11 $\pm$ 0,90	240,50 $\pm$ 1,03	
Relación AGV/Alcalinidad		0,29	0,03	

#### 5.1.4.1. Producción de biogás

En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con suero ácido. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del suero bruto.

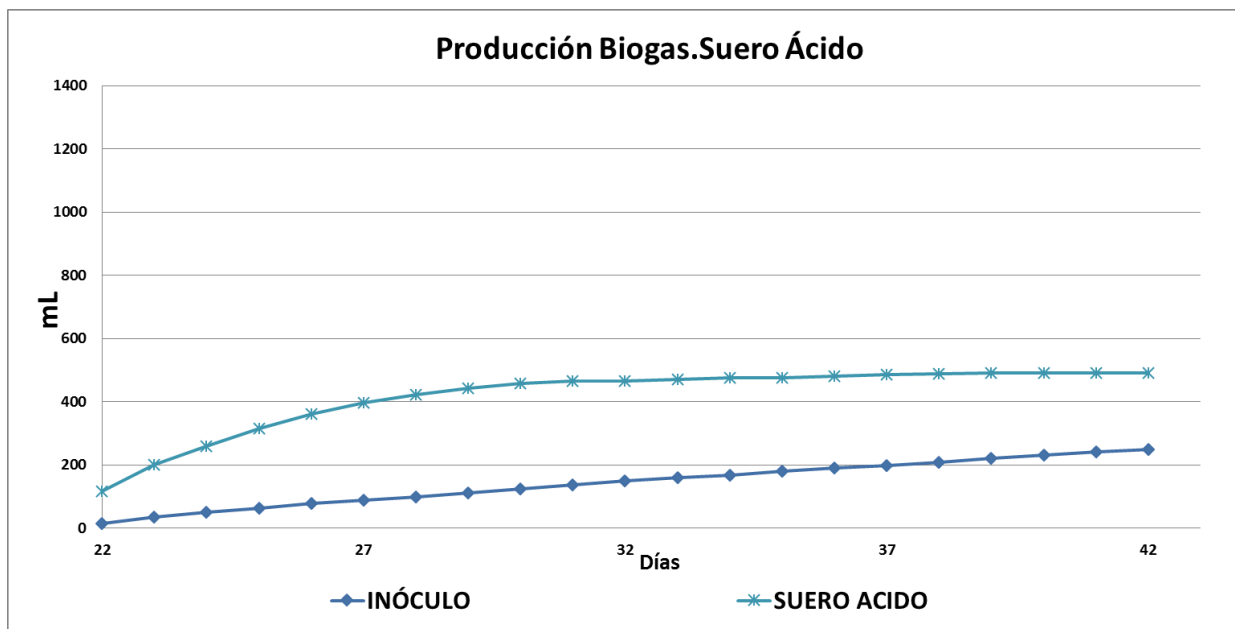
Tal y como se representa en la gráfica 19 de la **fase 1**, la adición del suero ácido, incrementa de manera significativa la producción de biogás. Se produce un crecimiento exponencial hasta el día 6, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, generándose un volumen total de 539 mL.



Gráfica 19. Producción Biogás Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

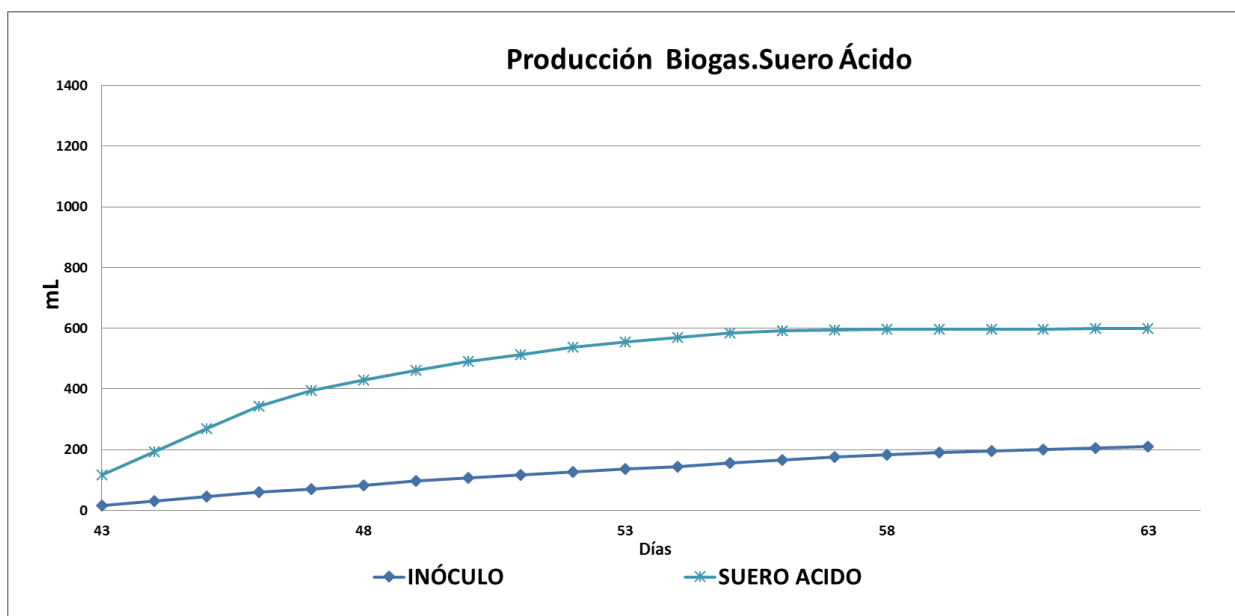
En la **fase 2**, como se representa en la gráfica 20. La adición del suero ácido, incrementa de la producción de biogás. Se produce un crecimiento exponencial hasta el día 27, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, generándose un volumen total de 491 mL.





Gráfica 20.Producción Biogás Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

Como se puede observar en la gráfica 21, respecto a la **fase 3**. La adición del suero ácido incrementa de manera significativa, teniendo un crecimiento exponencial hasta el día 47 y, llegando a los 600 mL.

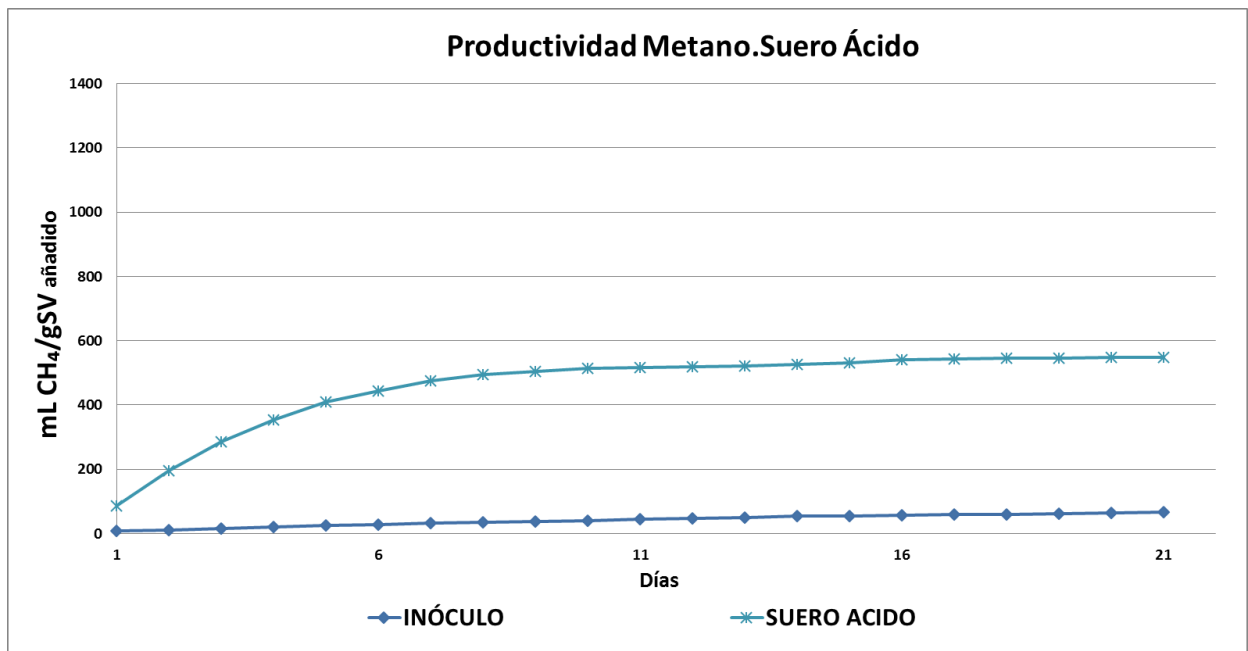


Gráfica 21. Producción Biogás Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

#### 5.1.4.2. Productividad de Metano

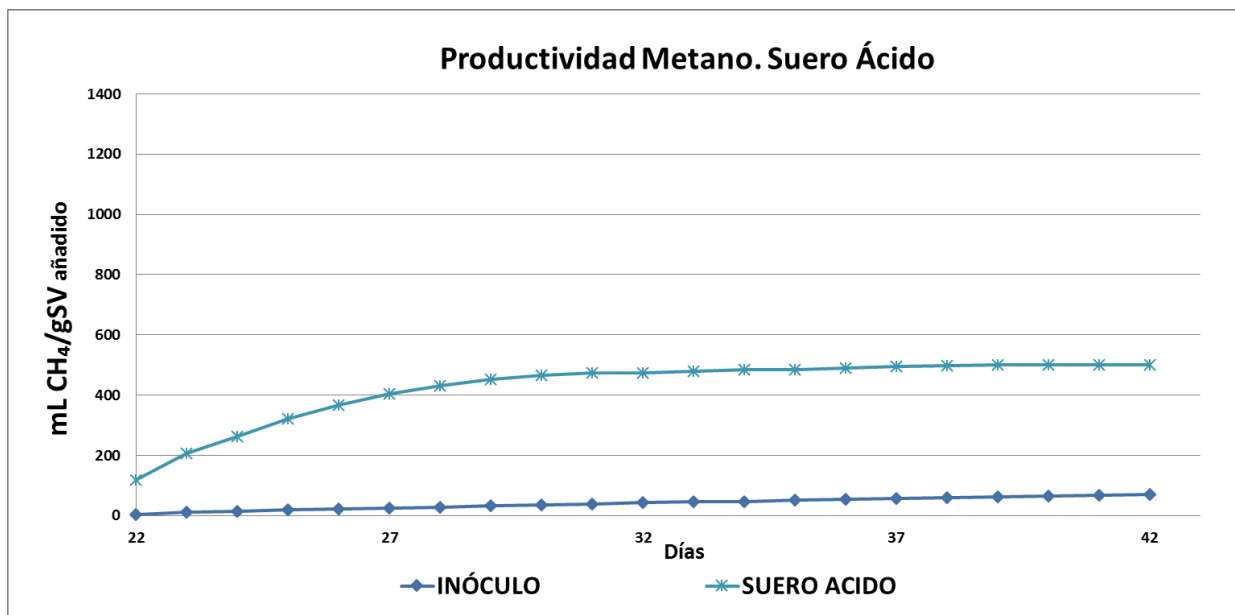
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con suero ácido, de las distintas fases temporales.

En la **fase 1**, la productividad de metano en el suero ácido ( $549 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ ), es superior a la del inóculo ( $67 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ ). Tal y como se puede observar en la gráfica 22.



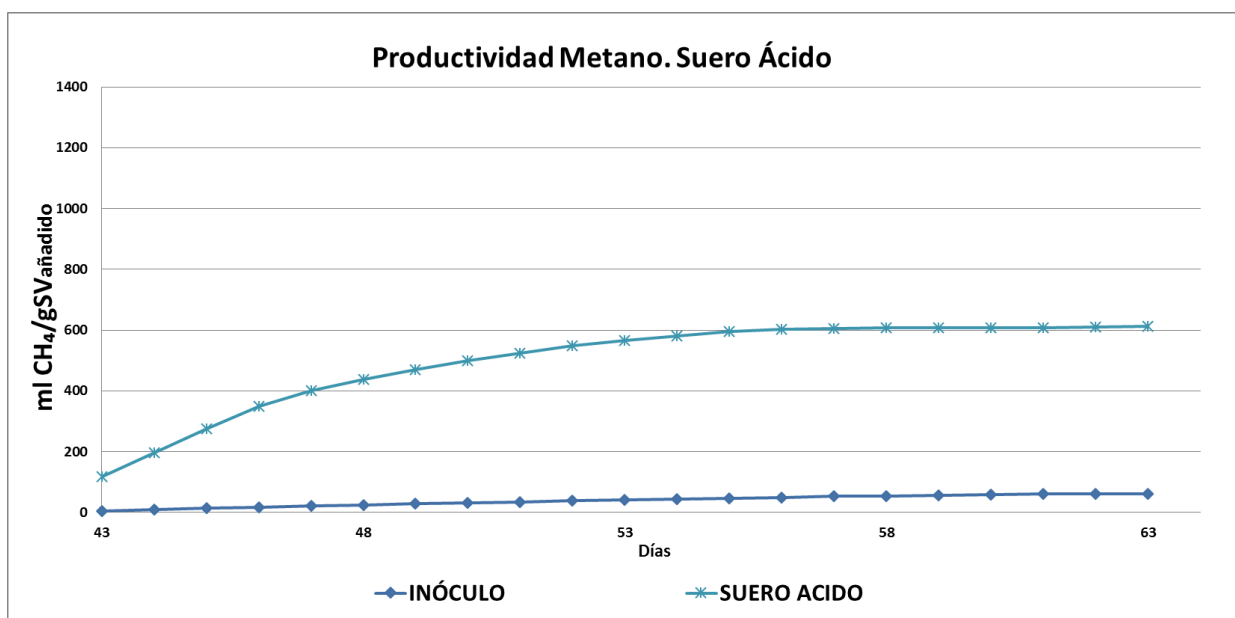
Gráfica 22. Productividad Metano Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

Tal y como se observa en la gráfica 23, de la fase 2. La productividad de metano en el suero ácido ( $501 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ ), es superior a la del inóculo ( $71 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ ).



Gráfica 23. Productividad Metano Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

En la **fase 3**, como se observa en la gráfica 24. La productividad de metano en el suero bruto, 611 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, es significativamente superior a la del inóculo (62 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).



Gráfica 24. Productividad Metano Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

#### **5.1.4.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. El porcentaje de metano en el ensayo con suero ácido es del 70%, aumentando en un 15% con respecto al ensayo del inóculo (55%).

A la vista de los resultados, la adición del suero ácido en una digestión anaerobia ha conducido a una mejora significativa en la producción de biogás y en la productividad de metano. Así como en el porcentaje de metano en el biogás.

### 5.1.5. Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Alperujo (Industria fabricación aceite de oliva)

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con alperujo. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1**, como se muestra en la tabla 14 de resultados analíticos. El alperujo tiene una entrada de DQO de  $23.467 \pm 0,77 \text{ mg L}^{-1}$  y una salida de  $12.421,08 \pm 0,76 \text{ mg L}^{-1}$  por lo que presenta una eliminación de materia orgánica del 47%. Con respecto a los sólidos, el porcentaje de eliminación es similar, siendo superior en los sólidos volátiles. La alcalinidad presenta un incremento a la salida y los AGV una disminución.

Tabla 14. Ensayo Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

#### Alperujo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$23.467,25 \pm 0,77$	$12.421,08 \pm 0,76$	47
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$23.672,35 \pm 0,80$	$16.570,80 \pm 0,85$	30
Materia Seca	%	2,37	1,66	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$14.422,94 \pm 0,82$	$9.850,96 \pm 0,88$	32
Materia Volátil	%	60,92	59,44	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,40 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,05 \pm 0,02$	$12,00 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$5.938,78 \pm 1,04$	$6.440,36 \pm 1,05$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$586,21 \pm 0,98$	$379,31 \pm 1,04$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$703,45 \pm 0,98$	$455,17 \pm 1,04$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,10	0,06	

Como se observa en la tabla 15, respecto a la **fase 2**. El alperujo tiene una DQO de entrada de  $25.222,56 \pm 0,70 \text{ mg L}^{-1}$  y una salida de  $12.223,35 \pm 0,78 \text{ mg L}^{-1}$  y, una eliminación de materia orgánica del 52%. Con respecto a los sólidos, tiene un porcentaje de eliminación similar, siendo superior en los sólidos volátiles (39%). La alcalinidad y los AGV presentan un incremento a la salida. Cabe destacar la disminución de la conductividad a un valor de  $10,27 \pm 0,02$ .

Tabla 15. Ensayo Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

### Alperujo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$25.222,56 \pm 0,70$	$12.223,35 \pm 0,78$	52
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$24.810,15 \pm 0,85$	$16.650,18 \pm 0,82$	33
Materia Seca	%	2,48	1,67	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$16.130,13 \pm 0,90$	$9.800,88 \pm 0,88$	39
Materia Volátil	%	65,01	58,86	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,26 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,05 \pm 0,02$	$10,27 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.998,10 \pm 1,02$	$7.000,12 \pm 1,04$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$365,52 \pm 0,90$	$462,00 \pm 0,99$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$438,62 \pm 0,90$	$454,76 \pm 0,99$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,09	0,07	

Los resultados analíticos de la **fase 3**, como se muestran en la tabla 16. El alperujo tiene una DQO de entrada de  $25.882,12 \pm 0,78 \text{ mg L}^{-1}$  y una salida de  $11.970,04 \pm 0,80 \text{ mg L}^{-1}$  y, una eliminación de materia orgánica del 54%. Con respecto a los sólidos, tiene un porcentaje de eliminación igual, un 39%. La alcalinidad presenta un incremento a la salida hasta un  $7.200,04 \pm 1,00 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ .

Tabla 16. Ensayo Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

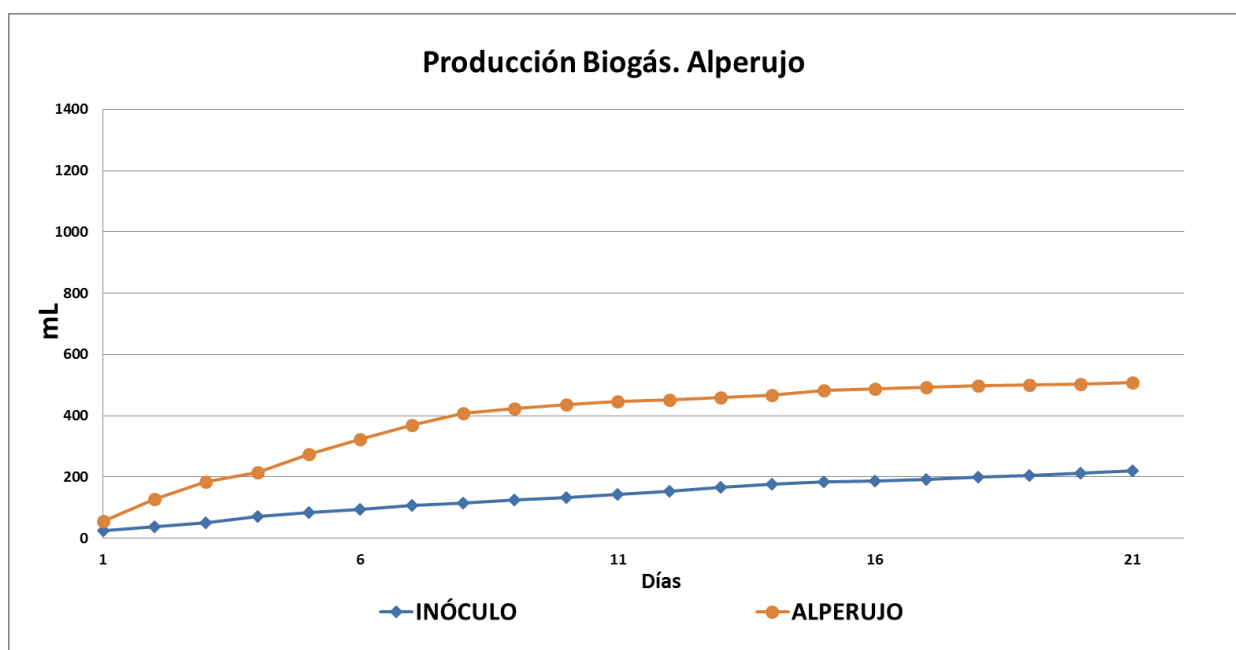
### Alperujo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$25.882,12 \pm 0,78$	$11.970,04 \pm 0,80$	54
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$26.102,62 \pm 0,88$	$15.840,55 \pm 0,90$	39
Materia Seca	%	2,61	1,58	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$17.035,25 \pm 0,89$	$10.340,03 \pm 0,86$	39
Materia Volátil	%	65,26	65,28	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,40 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$13,20 \pm 0,02$	$12,00 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.570,55 \pm 1,04$	$7.200,04 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$390,99 \pm 0,99$	$430,02 \pm 1,03$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$468,62 \pm 0,99$	$430,07 \pm 1,03$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,11	0,06	

### 5.1.5.1. Producción de biogás

En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con alperujo. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del alperujo.

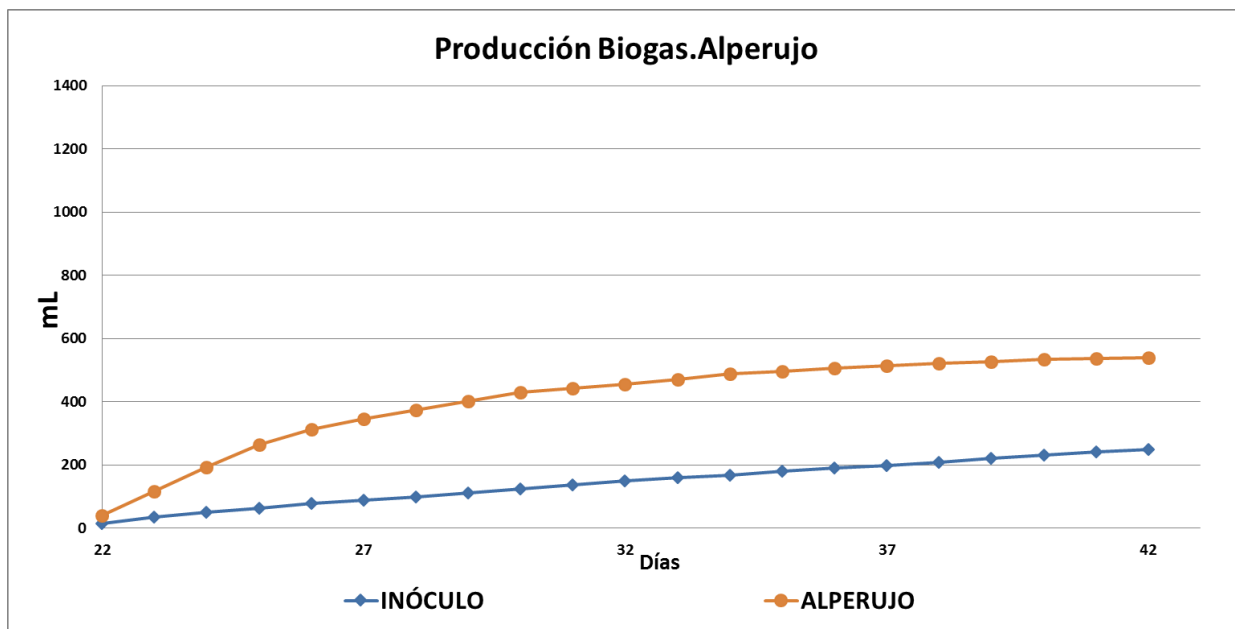
En la **fase 1**, tal y como se observa en la gráfica 25. La producción de biogás del alperujo presenta un crecimiento rápido hasta el día 8, en el cual se estabiliza, generando una producción total de 508 mL.



Gráfica 25. Producción Biogás Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

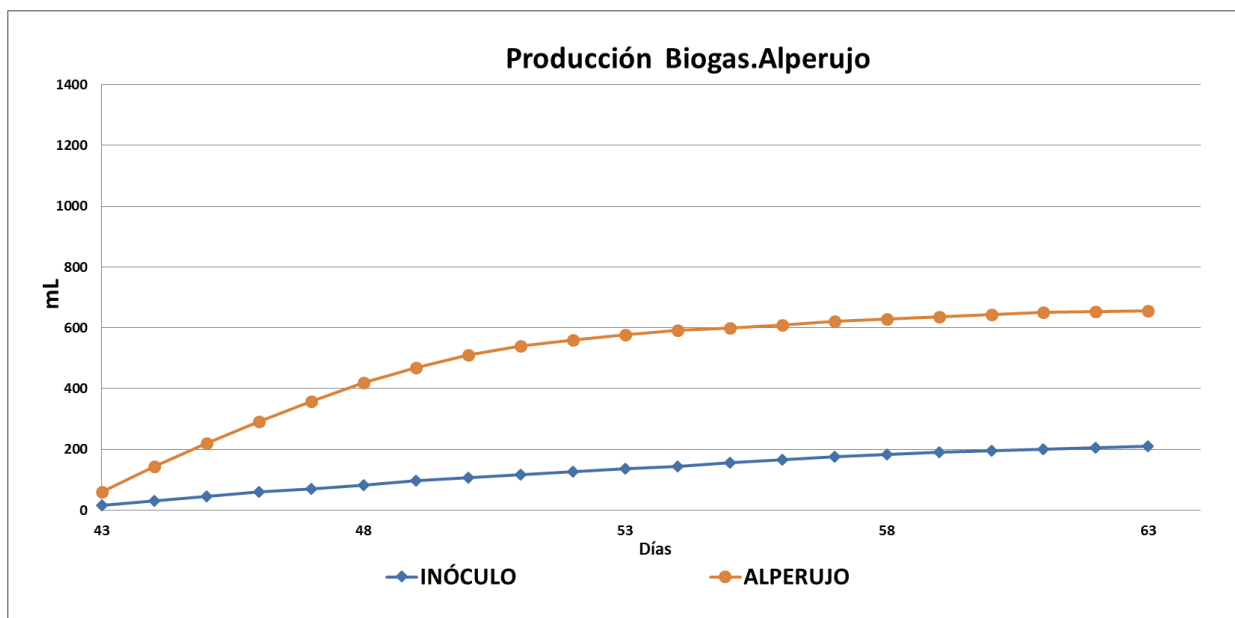
Como se observa en la gráfica 26, respecto a la **fase 2** del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con alperujo. La producción de biogás del alperujo presenta un crecimiento rápido hasta el día 26. La curva de la gráfica se estabiliza a partir del día 36, generando una producción total de 539 mL.





Gráfica 26. Producción Biogás Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

La producción de biogás del alperujo en la **fase 3**, presenta un crecimiento rápido hasta el día 51, estabilizándose en el día 53 y, generando una producción total de 657 mL, como se observa en la gráfica 27.

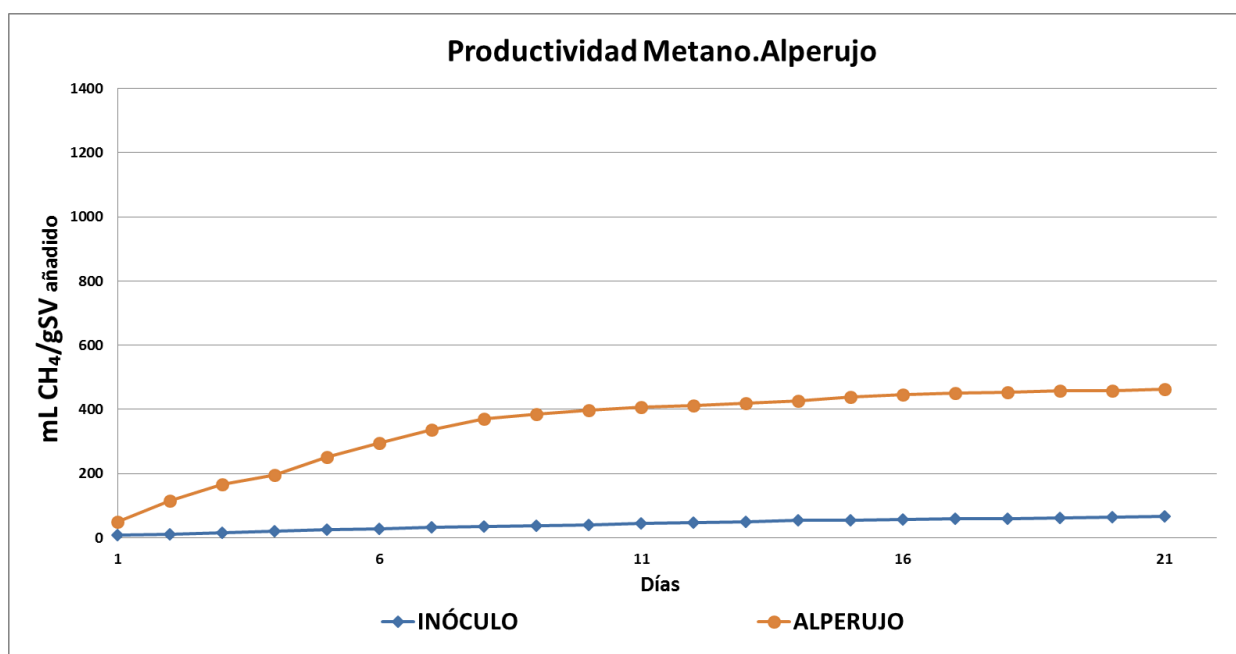


Gráfica 27. Producción Biogás Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase3

### 5.1.5.2. Productividad de Metano

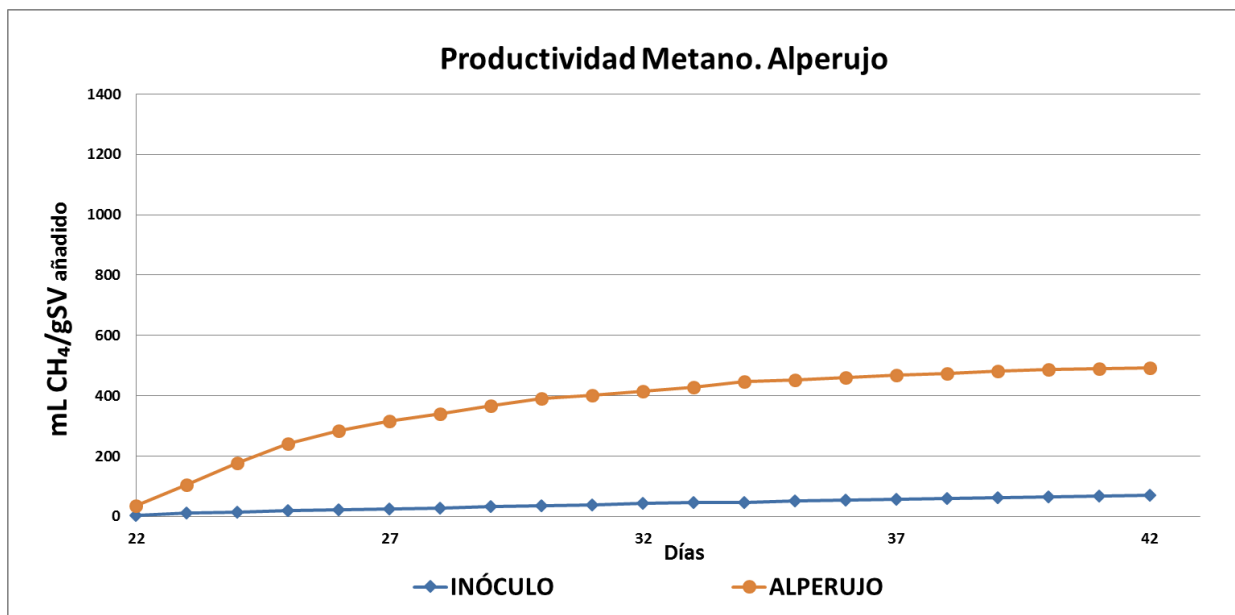
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con alperujo, de las distintas fases temporales.

Con respecto a la productividad de este residuo en la **fase 1**, es de 467 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> superior al inóculo de tan solo 67 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>. Tal y como se observa en la gráfica 28.



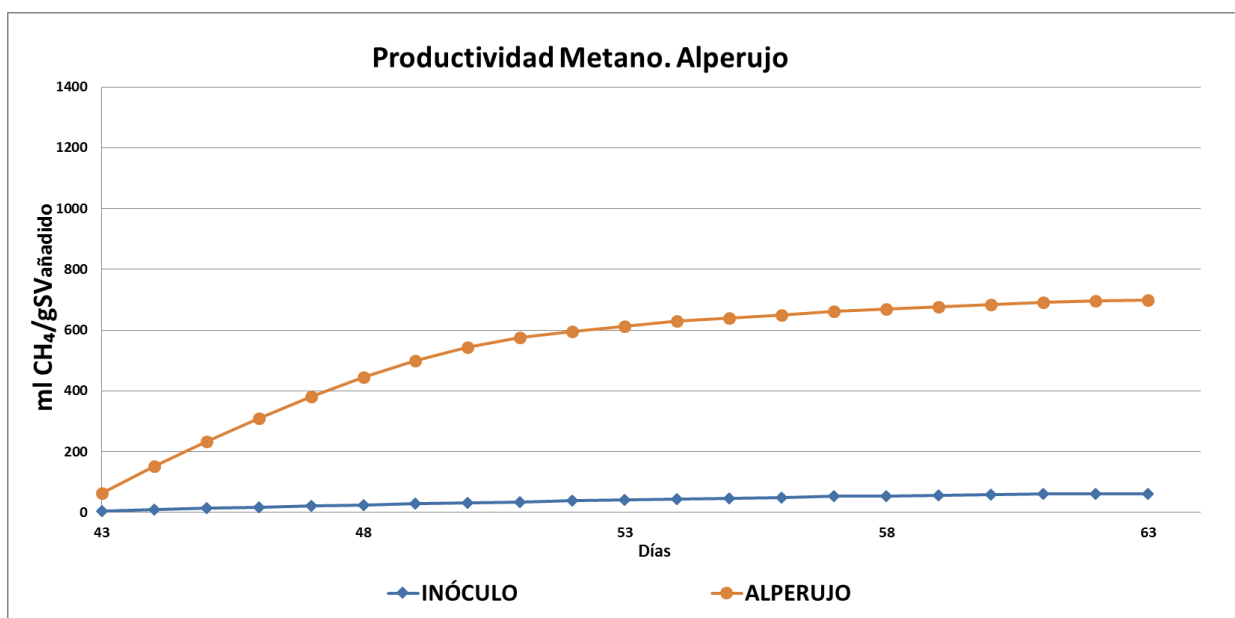
Gráfica 28.Productividad Metano Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

En la **fase 2**, como se representa en la gráfica 29.La productividad de este residuo, es de 491 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> superior al inóculo de tan solo 71 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 29. Productividad Metano Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

En la **fase 3** del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con alperujo, la productividad de metano en el alperujo, es de 699 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, superior a la del inóculo (62 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>). Tal y como se observa en la gráfica 30.



Gráfica 30. Productividad Metano Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

#### **5.1.5.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. El porcentaje de metano en el ensayo con alperujo es del 75%, aumentando en un 20% con respecto al ensayo del inóculo (55%).

A la vista de los resultados, la adición del residuo del alperujo en una digestión anaerobia ha conducido a una mejora significativa en la producción de biogás, en la productividad de metano y, en el porcentaje de metano en el biogás. A medida que transcurren las fases temporales del ensayo el rendimiento mejora.

### 5.1.6. Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Aguas de Glicerina (Industria biodiesel)

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con suero ácido. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

Como se representa en la tabla 17, respecto a la **fase 1** del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con glicerina. El residuo de la fabricación de biodiesel presenta una eliminación de materia orgánica del 49%. El porcentaje de eliminación de SV es del 34%. En cambio, el porcentaje de eliminación de los ST disminuye hasta el 23%.

Tabla 17. Ensayo Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

#### Glicerina

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	30.281,60 ±0,71	15.513,82 ±0,75	49
ST	mg L <sup>-1</sup>	27.394,66 ±0,84	20.980,94 ±0,80	23
Materia Seca	%	2,74	2,10	
SV	mg L <sup>-1</sup>	16.892,28 ±0,89	11.200,54 ±0,86	34
Materia Volátil	%	61,66	53,38	
pH		7,00 ±0,01	7,30 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	12,34 ±0,02	12,30 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	5.510,20 ±1,05	5.640,45 ±1,03	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	562,07 ±1,02	336,21 ±0,90	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	647,48 ±1,02	403,45 ±0,90	
Relación AGV/Alcalinidad		0,10	0,06	

En la **fase 2**, tal y como se observa en la tabla 18. El ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con glicerina presenta una eliminación de materia orgánica del 45%. El porcentaje de eliminación de ST es del 20%. En cambio, este porcentaje se reduce en los SV hasta el 16%. El pH aumenta a un  $7,33 \pm 0,01$ . Cabe destacar que la relación AGV/Alcalinidad pasa de un 0,20 a un 0,06 y, la conductividad aumenta a un  $13,66 \pm 0,02$  mS  $\text{cm}^{-1}$ .

Tabla 18. Ensayo Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

### Glicerina

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg $\text{L}^{-1}$	29.188,22 $\pm 0,75$	15.941,89 $\pm 0,72$	45
ST	mg $\text{L}^{-1}$	24.970,14 $\pm 0,80$	19.955,45 $\pm 0,85$	20
Materia Seca	%	2,50	2,00	
SV	mg $\text{L}^{-1}$	14.570,85 $\pm 0,90$	12.230,12 $\pm 0,89$	16
Materia Volátil	%	58,35	61,29	
pH		7,00 $\pm 0,01$	7,33 $\pm 0,01$	
Conductividad	mS $\text{cm}^{-1}$	12,34 $\pm 0,02$	13,66 $\pm 0,02$	
Alcalinidad	mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	4.400,45 $\pm 1,04$	7.000,78 $\pm 1,03$	
AGV	mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	879,31 $\pm 0,95$	385,47 $\pm 1,01$	
AGV	mg $\text{CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	1.055,17 $\pm 0,95$	462,89 $\pm 1,01$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,20	0,06	

Como se observa en la tabla 19, en la **fase 3** el residuo de la fabricación de biodiesel presenta una eliminación de materia orgánica del 46%. El porcentaje de eliminación de ST es del 24%. Sin embargo, en sólidos volátiles presenta un porcentaje de eliminación del 23%. El pH aumenta hasta  $7,30 \pm 0,01$ .

Tabla 19. Ensayo Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

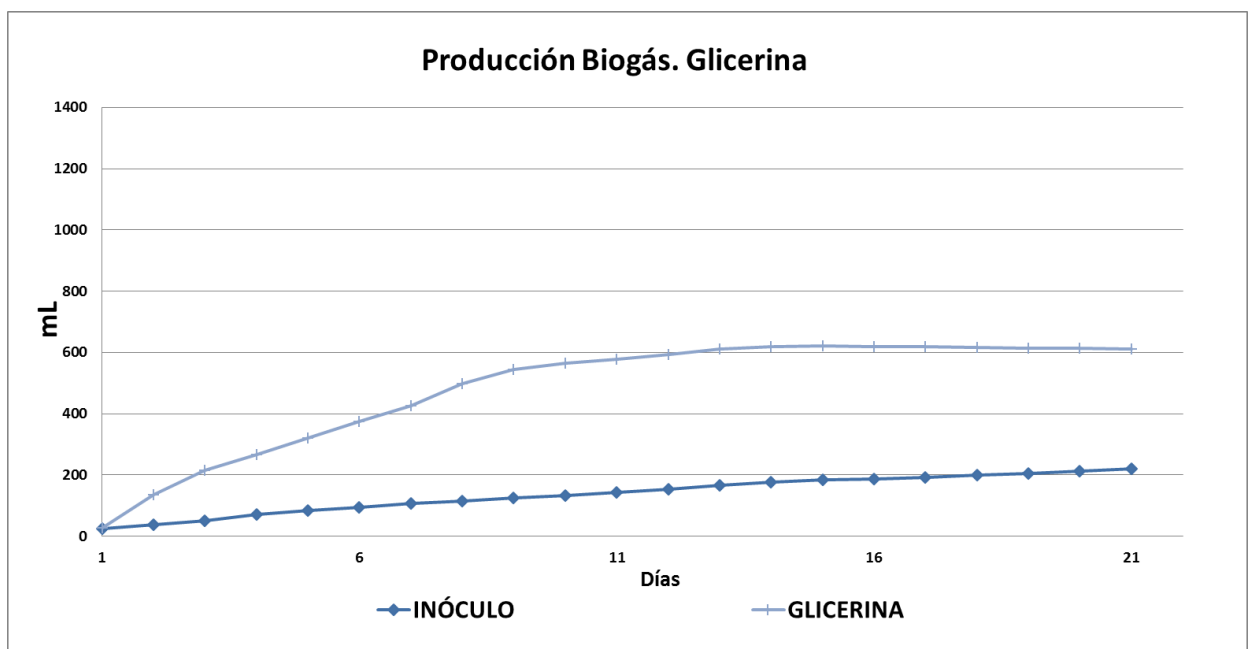
### Glicerina

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	29.188,78 ±0,77	15.620,05 ±0,78	46
ST	mg L <sup>-1</sup>	24.970,21 ±0,80	18.860,03 ±0,88	24
Materia Seca	%	2,50	1,89	
SV	mg L <sup>-1</sup>	14.570,55 ±0,90	11.280,54 ±0,81	23
Materia Volátil	%	58,35	59,81	
pH		7,00 ±0,01	7,30 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	14,45 ±0,02	12,30 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	6.000,41 ±1,02	7.110,18 ±1,04	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	520,22 ±0,93	390,36 ±1,02	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	624,55 ±0,93	470,70 ±1,02	
Relación AGV/Alcalinidad		0,09	0,05	

### 5.1.6.1. Producción de biogás

En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con glicerina. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva de la glicerina.

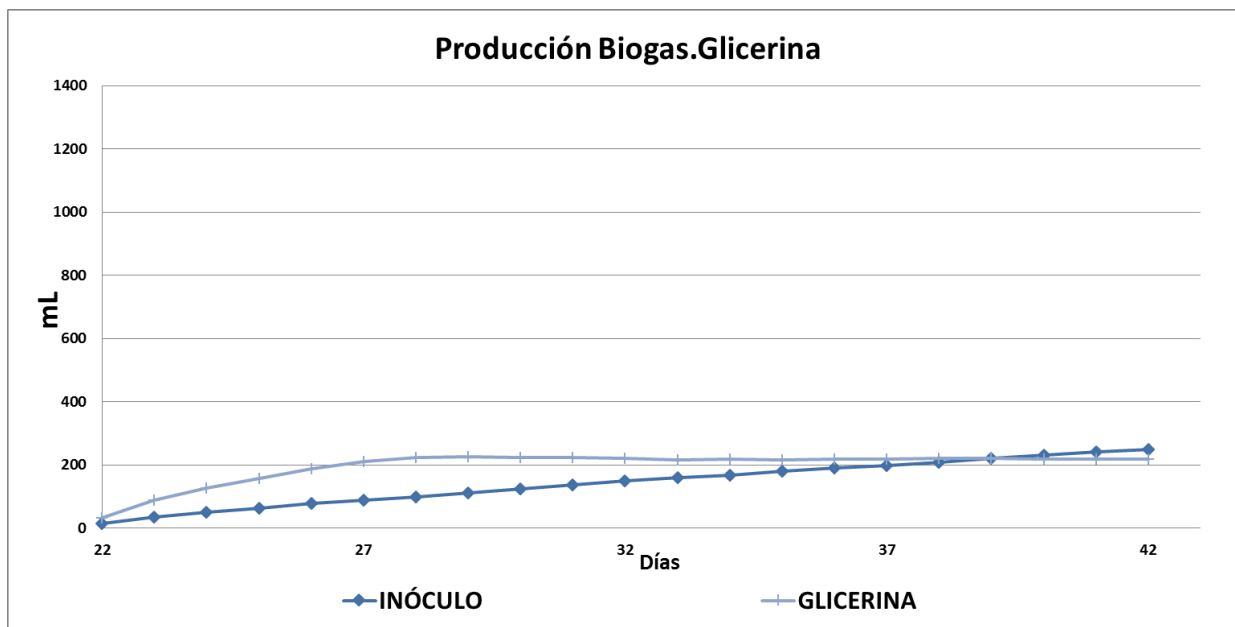
Como se puede observar en la gráfica 31, en la **fase 1** la glicerina presenta un crecimiento exponencial hasta el día 3. Del día 3 al 7, la producción de biogás se ralentiza y, del día 7 al 9, presenta un incremento en dicha producción, a partir del cual se estabiliza generando una producción total de 611 mL



Gráfica 31. Producción de Biogás Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

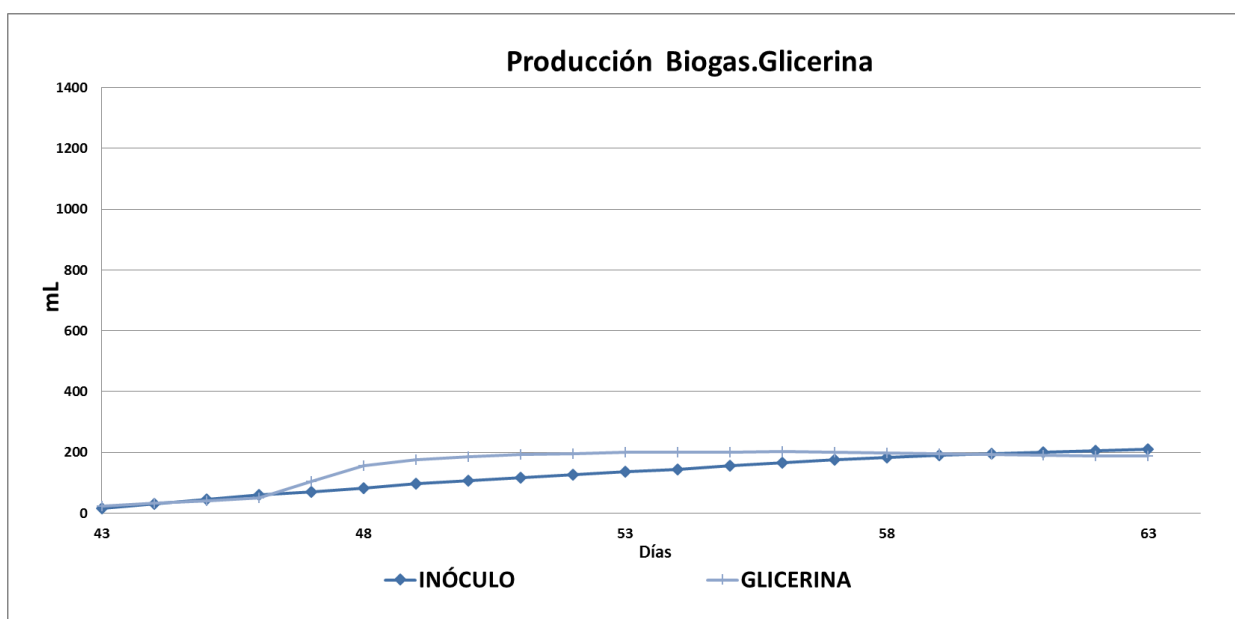
En la **fase 2** la producción de biogás del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con glicerina, presenta un crecimiento exponencial hasta el día 27, a partir del cual se estabiliza. Cabe destacar que, del día 37 en adelante, el inóculo genera más volumen de biogás que la glicerina. La producción total de biogás de la glicerina es de 218 mL y la del inóculo 249 mL. Tal y como se observa en la gráfica 32.





Gráfica 32.Producción Biogás Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

Como se puede observar en la gráfica 33, con respecto a la **fase 3**. La glicerina presenta una fase de retardo hasta el día 46. Del día 46 al 48, la producción de biogás, presenta un incremento. A partir del 48 se estabiliza, generando una producción total de 187 mL. El volumen de biogás generado por la glicerina es inferior al del inóculo (209mL)

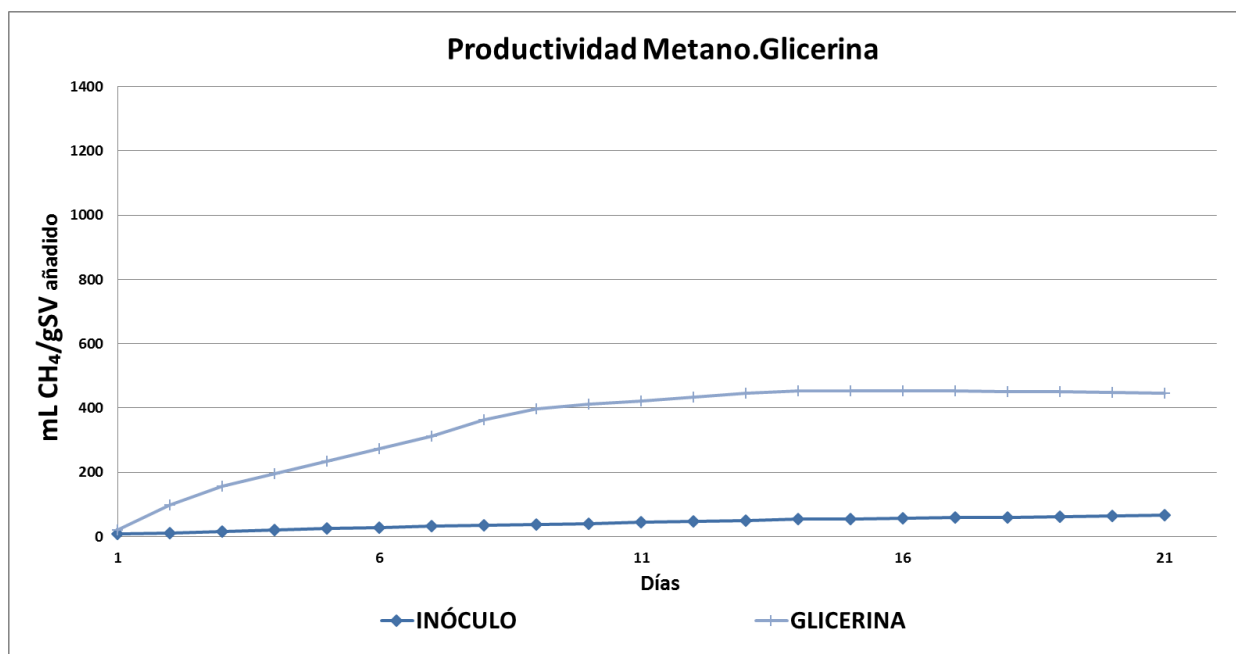


Gráfica 33. Producción Biogás Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

### 5.1.6.2. Productividad de Metano

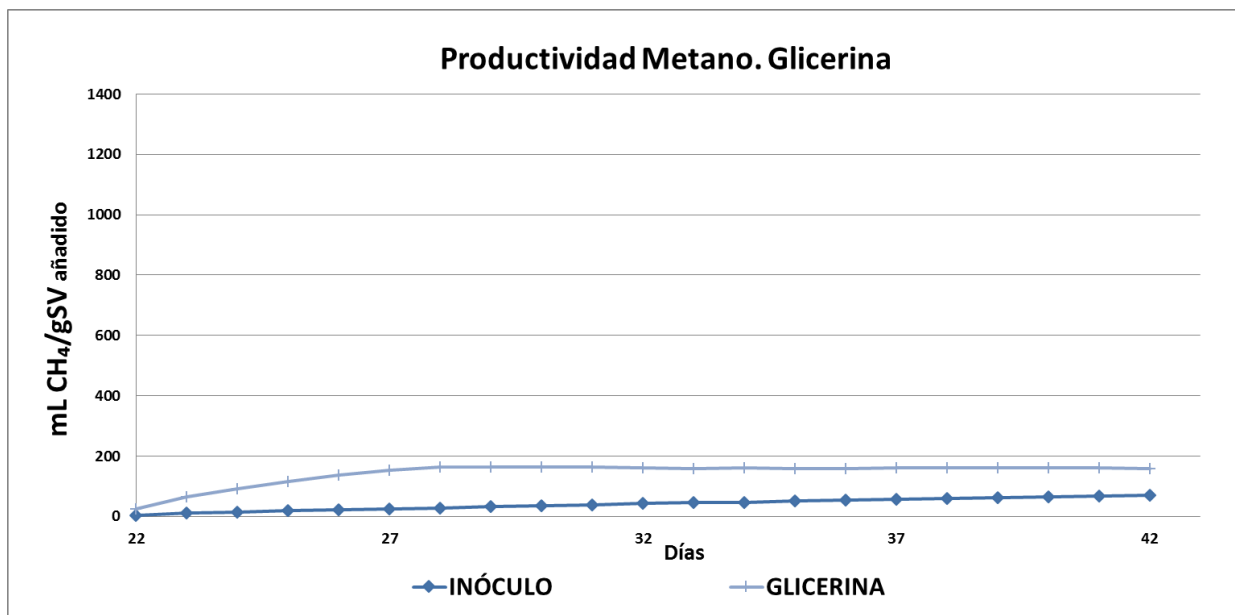
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con suero ácido, de las distintas fases temporales.

En la **fase 1**, tal y como se representa en la gráfica 34. La productividad de metano en el ensayo de la glicerina es de 447 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, siendo muy superior al inóculo.



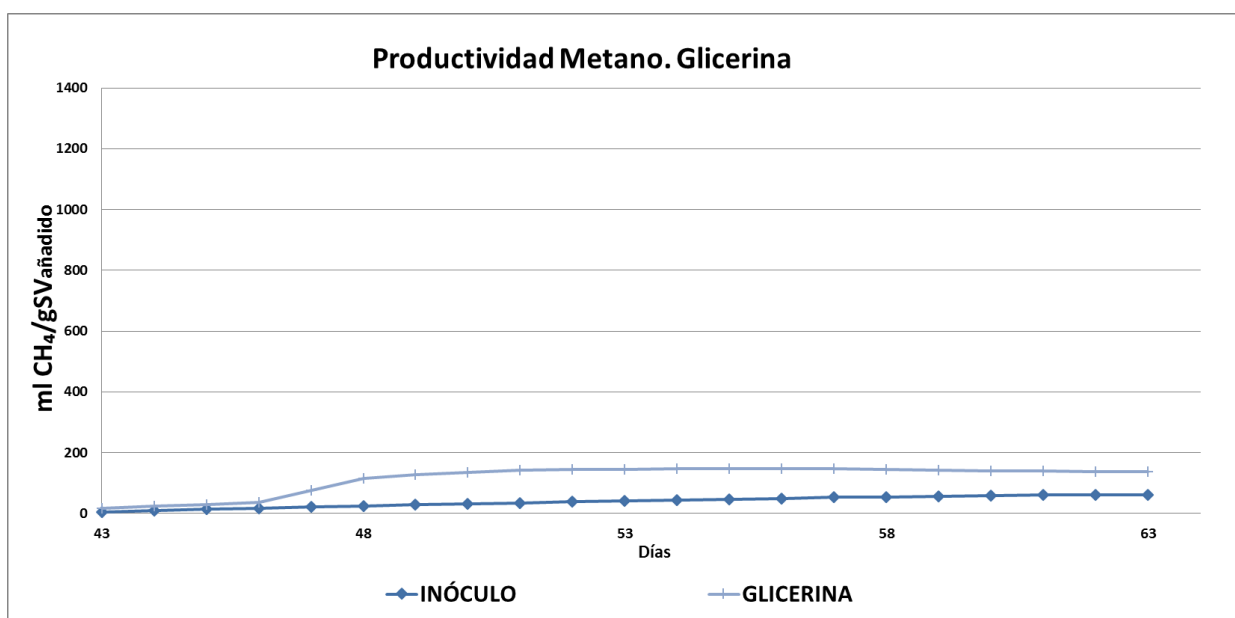
Gráfica 34. Productividad Metano Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

Como se muestra en la gráfica 35, en la **fase 2** del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con glicerina la productividad de metano es de 160 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 35. Productividad Metano Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

Tal y como se muestra en la gráfica 36, respecto a la **fase 3**. La productividad de metano en el ensayo de la glicerina es de 137 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 36. Productividad Metano Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

#### **5.1.6.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. El porcentaje de metano en el ensayo con fango mixto es del 60%, aumentando en un 5% con respecto al ensayo del inóculo (55%).

A la vista de los resultados, la adición de la glicerina en una digestión anaerobia no mejora producción de biogás y la productividad de metano, decayendo drásticamente la producción. Por lo que presentan problemas de estabilidad en el proceso de digestión anaerobia.

### 5.1.7. Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con lixiviado

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con lixiviado. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1**, como se observa en la tabla 20. El lixiviado presenta una eliminación de materia orgánica del 44%. El porcentaje de eliminación de SV es del 17% y, el de ST es de un 14%. La alcalinidad en la entrada y salida del ensayo está entorno a los 6.000 mg  $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . El pH aumenta en la salida del ensayo a  $7,25 \pm 0,01$ .

Tabla 20. Ensayo Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

#### Lixiviado

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$16.141,45 \pm 0,78$	$9.060,63 \pm 0,75$	44
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$15.576,87 \pm 0,84$	$13.435,41 \pm 0,86$	14
Materia Seca	%	1,56	1,34	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$6.516,22 \pm 0,82$	$5.415,35 \pm 0,90$	17
Materia Volátil	%	41,83	40,31	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,25 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,00 \pm 0,02$	$12,00 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$6.020,41 \pm 1,08$	$6.300,87 \pm 1,05$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$396,55 \pm 1,04$	$275,86 \pm 0,98$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$475,86 \pm 1,04$	$331,03 \pm 0,98$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,07	0,04	

Como se observa en la tabla 21, respecto a la **fase 2**. El lixiviado presenta una eliminación de DQO del 30%. En los SV presenta una eliminación del 17% y en los ST el porcentaje de eliminación es de un 16%. La alcalinidad en la entrada es de  $5.600,23 \pm 1,02$  mg  $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$  y en salida del ensayo es de  $8.000,36 \pm 1,03$  mg  $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . Cabe destacar un aumento significativo en la conductividad siendo  $22,51 \pm 0,02$ .

Tabla 21. Ensayo Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

### Lixiviado

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg $\text{L}^{-1}$	16.991,10 $\pm 0,78$	11.935,98 $\pm 0,75$	30
ST	mg $\text{L}^{-1}$	15.515,12 $\pm 0,83$	12.970,45 $\pm 0,80$	16
Materia Seca	%	1,55	1,30	
SV	mg $\text{L}^{-1}$	6.565,10 $\pm 0,81$	5.450,12 $\pm 0,82$	17
Materia Volátil	%	42,31	42,02	
pH		7,00 $\pm 0,01$	7,75 $\pm 0,01$	
Conductividad	mS $\text{cm}^{-1}$	12,00 $\pm 0,02$	22,51 $\pm 0,02$	
Alcalinidad	mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	5.600,23 $\pm 1,02$	8.000,36 $\pm 1,03$	
AGV	mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	344,83 $\pm 1,01$	345,25 $\pm 1,01$	
AGV	mg $\text{CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	413,79 $\pm 1,01$	414,12 $\pm 1,01$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,06	0,04	

En la fase 3, tal y como se observa en la tabla 22. El lixiviado presenta una eliminación de DQO del 36%. El porcentaje de eliminación de los SV es del 23% y el de los es del 21%. La alcalinidad en la entrada es de  $4.800,11 \pm 1,03 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$  y, a la salida del ensayo es de  $8.050,22 \pm 1,06 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$

Tabla 22. Ensayo Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

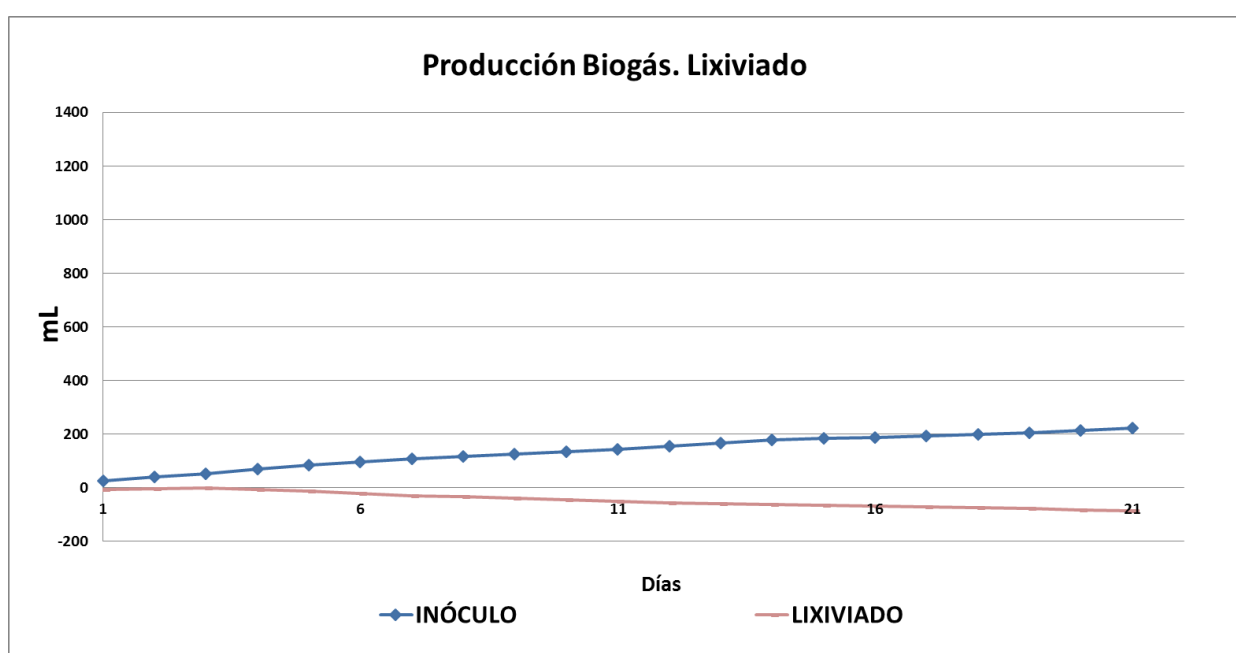
### Lixiviado

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$15.991,14 \pm 0,70$	$1.0210,05 \pm 0,74$	36
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$15.540,25 \pm 0,85$	$1.2320,41 \pm 0,90$	21
Materia Seca	%	1,55	1,23	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$6.612,30 \pm 0,90$	$5120,08 \pm 0,85$	23
Materia Volátil	%	42,55	41,56	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,25 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$14,56 \pm 0,02$	$12,00 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.800,11 \pm 1,03$	$8050,22 \pm 1,06$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$390,98 \pm 0,95$	$350,01 \pm 1,04$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$468,41 \pm 0,95$	$415,65 \pm 1,04$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,08	0,04	

### 5.1.7.1. Producción de biogás

En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con lixiviado. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del lixiviado.

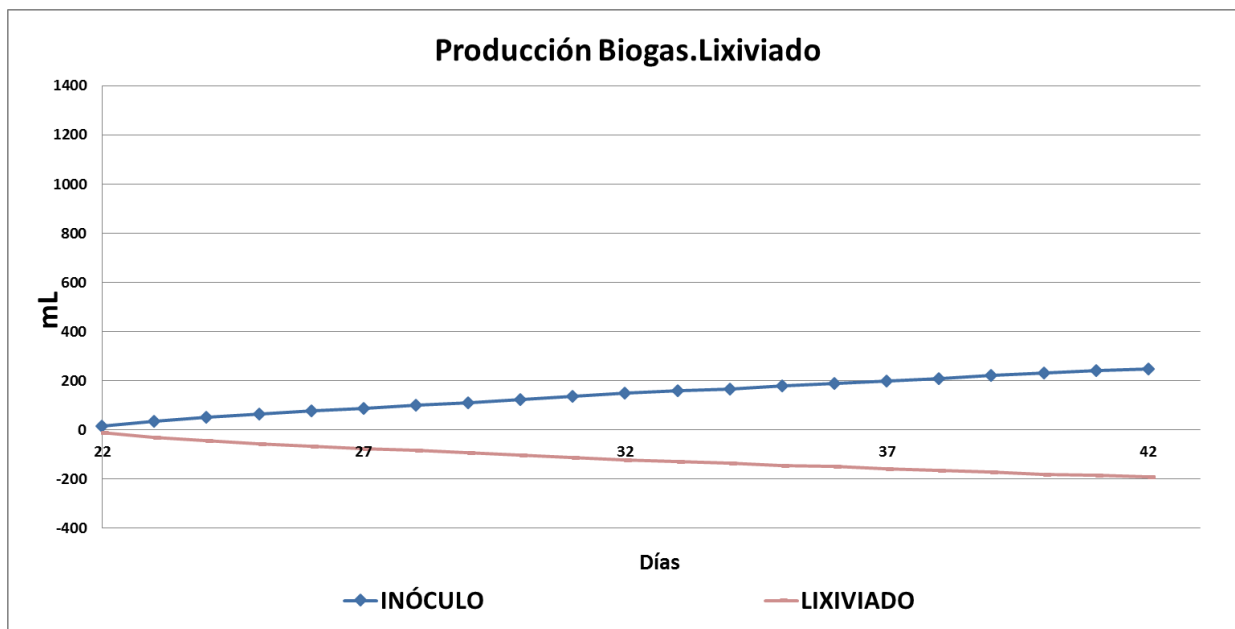
En la **fase 1**, la producción de biogás del lixiviado es menor a la del inóculo. A medida que transcurren los días del ensayo, no se estabiliza la producción de biogás sino que, sigue disminuyendo. Tal y como se puede observar en la gráfica 37.



Gráfica 37. Producción Biogás Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

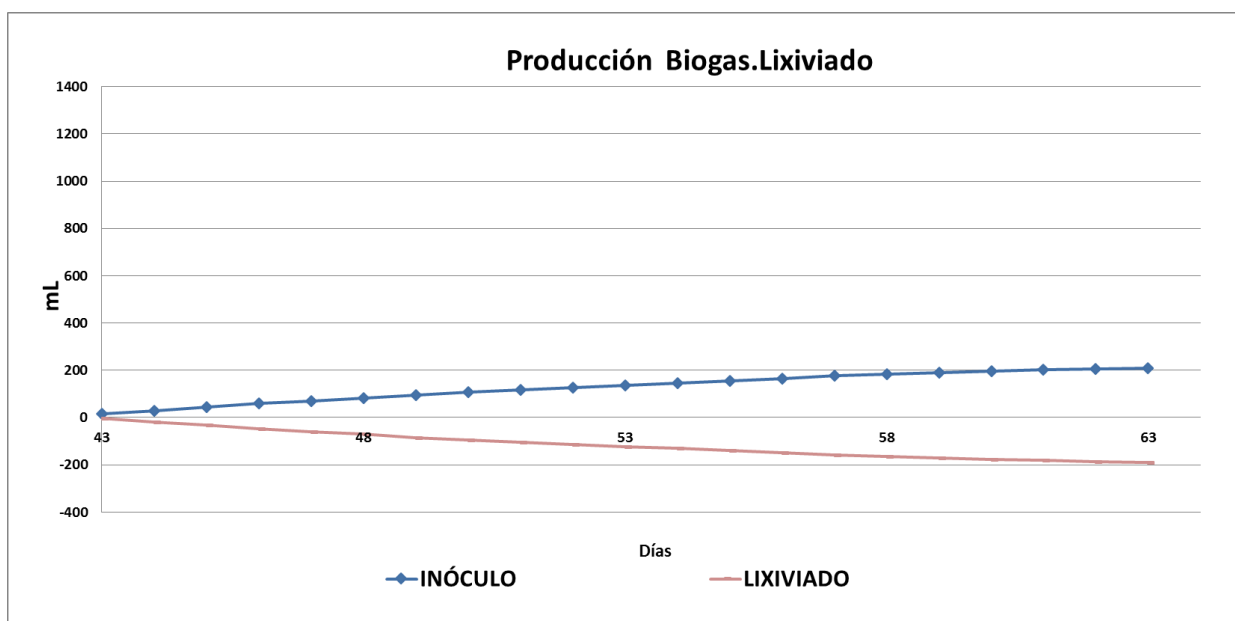
En la **fase 2**, como se representa en la gráfica 38, la producción de biogás del lixiviado es significativamente menor a la del inóculo. A medida que transcurren los días del ensayo, no se estabiliza la producción de biogás, sino que sigue disminuyendo.





Gráfica 38. Producción Biogás Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

Como se puede observar en la gráfica 39, respecto a la **fase 3** la producción de biogás del lixiviado es menor a la del inóculo.

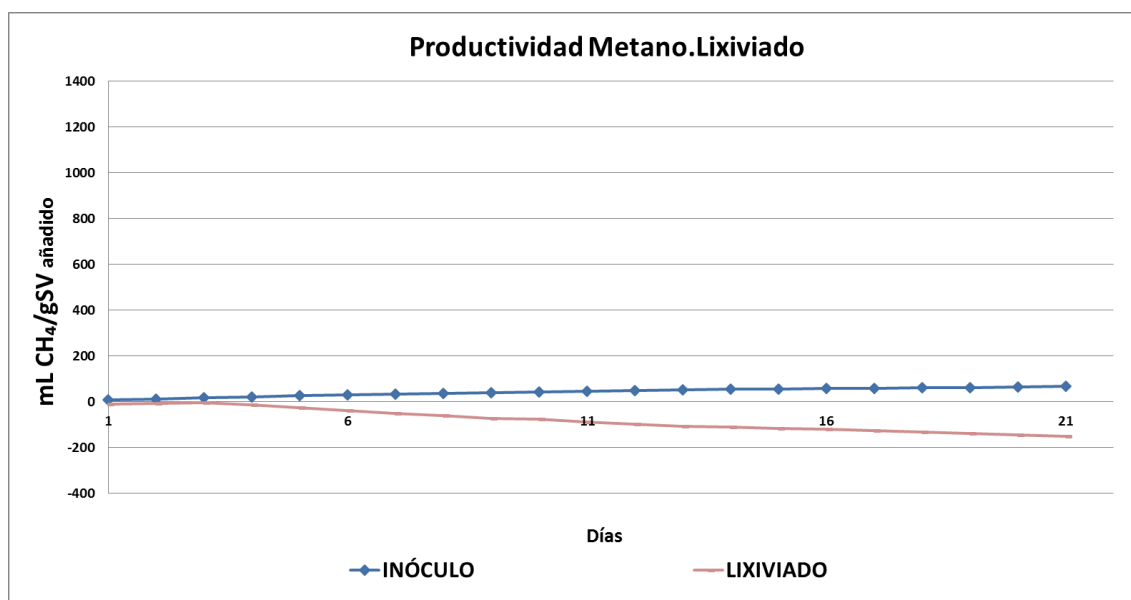


Gráfica 39. Producción Biogás Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

### 5.1.7.2. Productividad de Metano

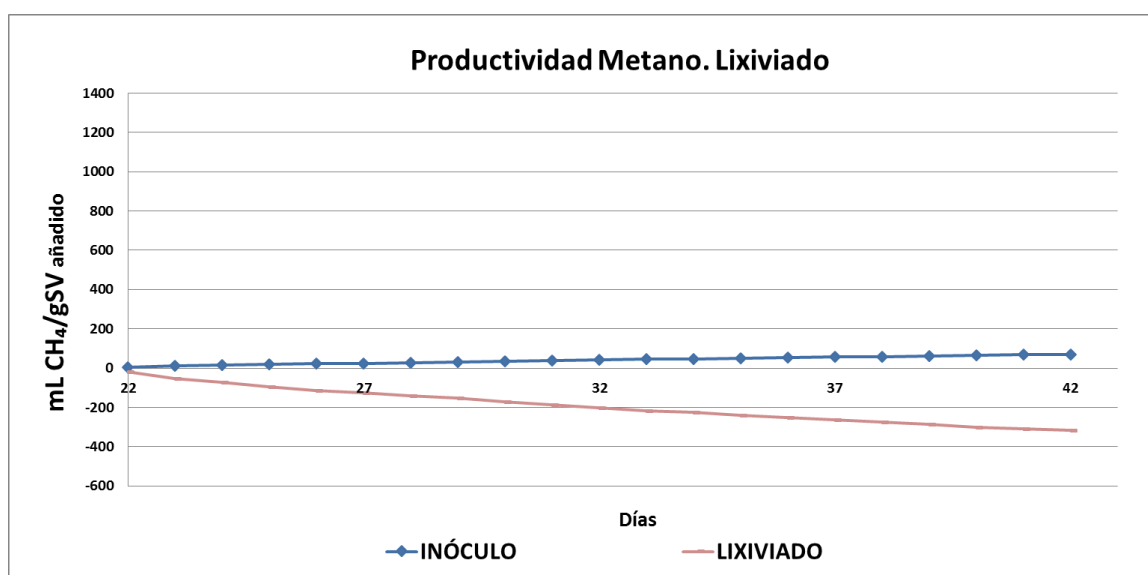
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con suero ácido, de las distintas fases temporales.

En la **fase 1**, como se representa en la gráfica 40 la productividad de metano del lixiviado es menor a la del inóculo.



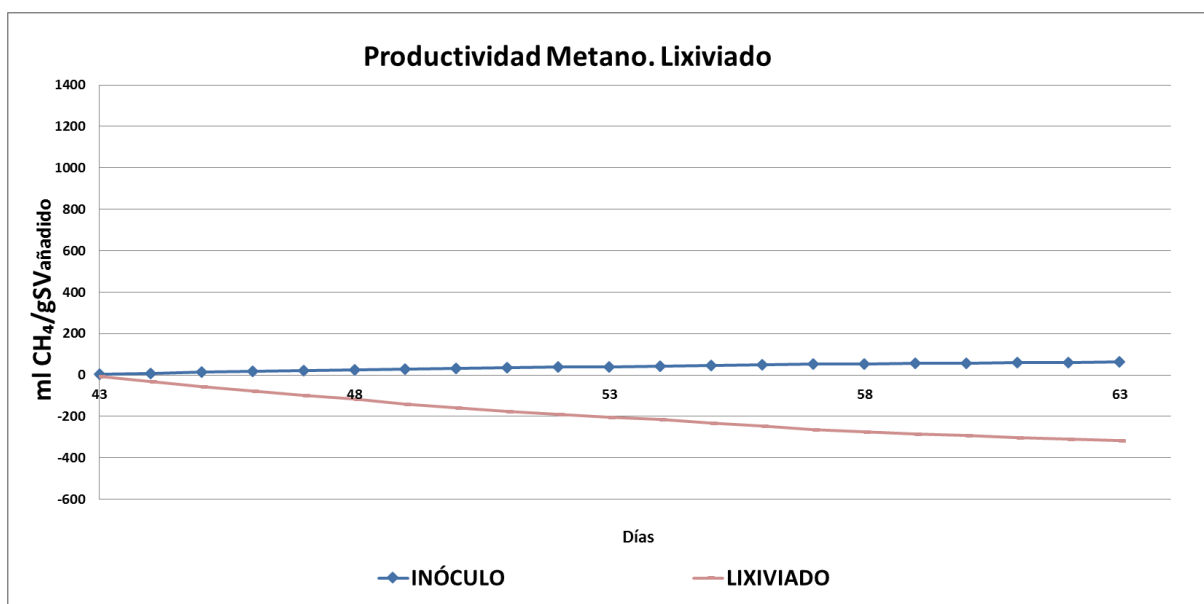
Gráfica 40.Productividad Metano Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

Al igual que en la fase 1, en la **fase 2** la productividad de metano del lixiviado es menor a la del inóculo. Tal y como se observa en la gráfica 41.



Gráfica 41. Productividad Metano Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

En la **fase 3** la diferencia en la productividad con el inóculo es más significativa, con respecto a las fases anteriores. Tal y como se representa en la gráfica 42.



Gráfica 42. Productividad Metano Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

### 5.1.7.3. Evolución del metano en el biogás

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. El porcentaje de metano en el ensayo con lixiviado es del 65%, aumentando en un 10% con respecto al ensayo del inóculo (55%).

A la vista de los resultados, la adición del lixiviado en una digestión anaerobia empeora la producción de biogás y la productividad de metano, por lo que es un residuo de difícil tratamiento en una digestión anaerobia

### 5.1.8. Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Alpechín (Industria fabricación aceite de oliva)

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con alpechín. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1**, como se observa en la tabla 23. El residuo de la fabricación de aceite de oliva, presenta una eliminación de materia orgánica es del 51%. La eliminación de SV presenta un porcentaje del 29%, similar al porcentaje de los ST (26%). La conductividad del ensayo disminuye y, la relación AGV/ alcalinidad pasa de un 0,22 a un 0,05. El pH aumenta hasta  $7,41 \pm 0,01$ .

Tabla 23. Ensayo Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

#### Alpechín

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	20.651,84 ±0,75	10.134,18 ±0,73	51
ST	mg L <sup>-1</sup>	17.078,15 ±0,85	12.620,22 ±0,80	26
Materia Seca	%	1,71	1,26	
SV	mg L <sup>-1</sup>	8.926,56 ±0,86	6.370,41 ±0,90	29
Materia Volátil	%	52,27	50,48	
pH		7,00 ±0,01	7,41 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	16,99 ±0,02	16,00 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	4.040,82 ±1,05	4.920,48 ±1,03	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	874,14 ±0,98	241,38 ±1,04	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	1.048,97 ±0,98	289,66 ±1,04	
Relación AGV/Alcalinidad		0,22	0,05	

En la **fase 2**, como se representa en la tabla 24. El residuo de la fabricación de aceite de oliva presenta una eliminación de materia orgánica del 43%. El porcentaje de eliminación de los SV es de 43%, sin embargo el de los ST es del 21%. La conductividad del ensayo disminuye significativamente y, la relación AGV/ alcalinidad pasa de un 0,17 a un 0,08, así como, el porcentaje de materia volátil, de un 68,03 a un 49,01.

Tabla 24. Ensayo Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

### Alpechín

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	21.516,74 ±0,77	12.181,89 ±0,79	43
ST	mg L <sup>-1</sup>	16.560,12 ±0,85	13.120,25 ±0,80	21
Materia Seca	%	1,66	1,31	
SV	mg L <sup>-1</sup>	11.265,14 ±0,80	6.430,22 ±0,85	43
Materia Volátil	%	68,03	49,01	
pH		7,00 ±0,01	7,17 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	16,99 ±0,02	9,24 ±0,20	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	3.200,69 ±1,08	4.200,41 ±1,06	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	551,72 ±1,01	344,83 ±0,98	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	662,07 ±1,01	413,79 ±0,98	
Relación AGV/Alcalinidad		0,17	0,08	

Tal y como se observa en la tabla 25, en la **fase 3** el ensayo de digestión anaerobia con el alpechín presenta una eliminación de DQO del 52%. El porcentaje de eliminación de SV es del 48%, sin embargo, el de los ST es del 36%. La conductividad del ensayo disminuye significativamente y, la relación AGV/ alcalinidad pasa de un 0,18 a un 0,07.

Tabla 25. Ensayo Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

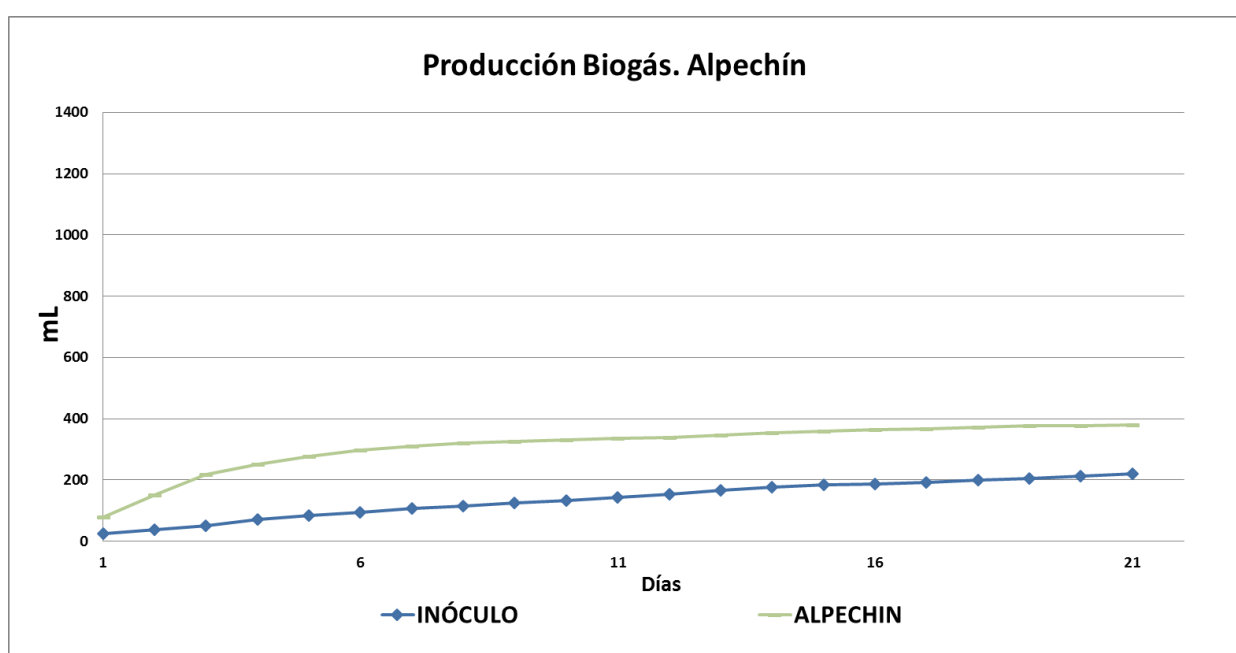
### Alpechín

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	22.240,41 ±0,78	10.568,22 ±0,75	52
ST	mg L <sup>-1</sup>	19.450,10 ±0,86	12.540,11 ±0,90	36
Materia Seca	%	1,95	1,25	
SV	mg L <sup>-1</sup>	12.010,09 ±0,90	6.220,02 ±0,86	48
Materia Volátil	%	61,75	49,60	
pH		7,00 ±0,01	7,41 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	13,25 ±0,02	12,25 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	2.500,25 ±1,05	4.120,62 ±1,06	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	450,84 ±0,97	300,12 ±1,04	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	540,42 ±0,97	414,30 ±1,04	
Relación AGV/Alcalinidad		0,18	0,07	

### 5.1.8.1. Producción de biogás

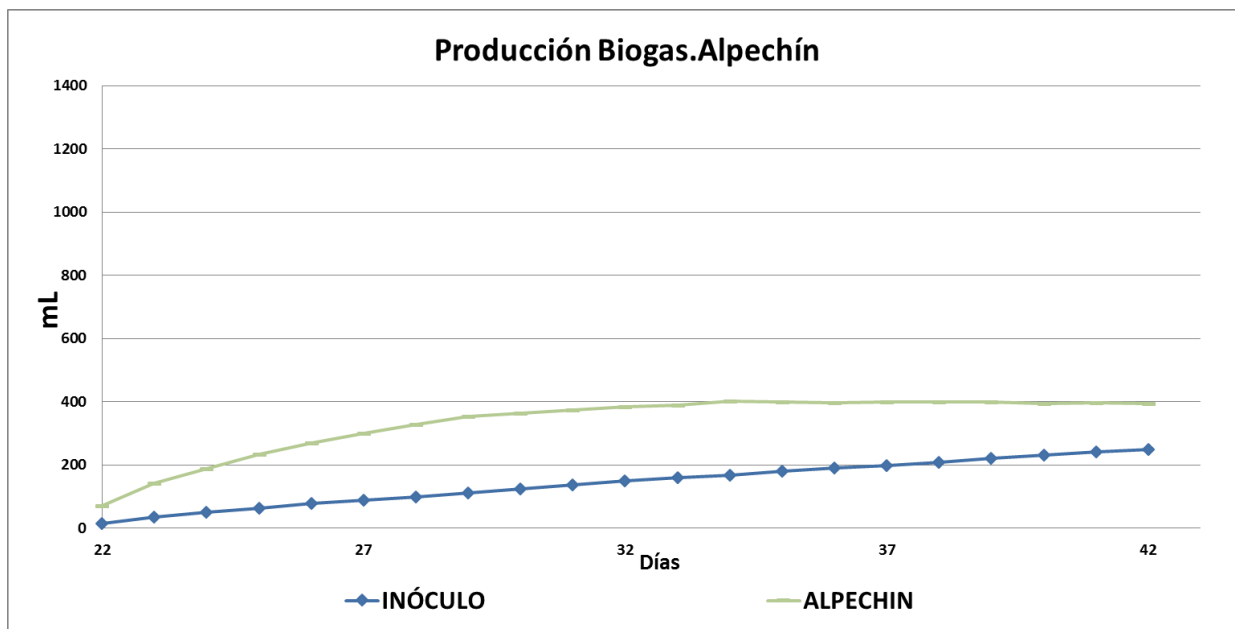
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con alpechín. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del alpechín.

Como se puede observar en la gráfica 43, en la **fase 1** el alpechín presenta un crecimiento exponencial hasta el día 3, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, generando un volumen total de 379 mL.



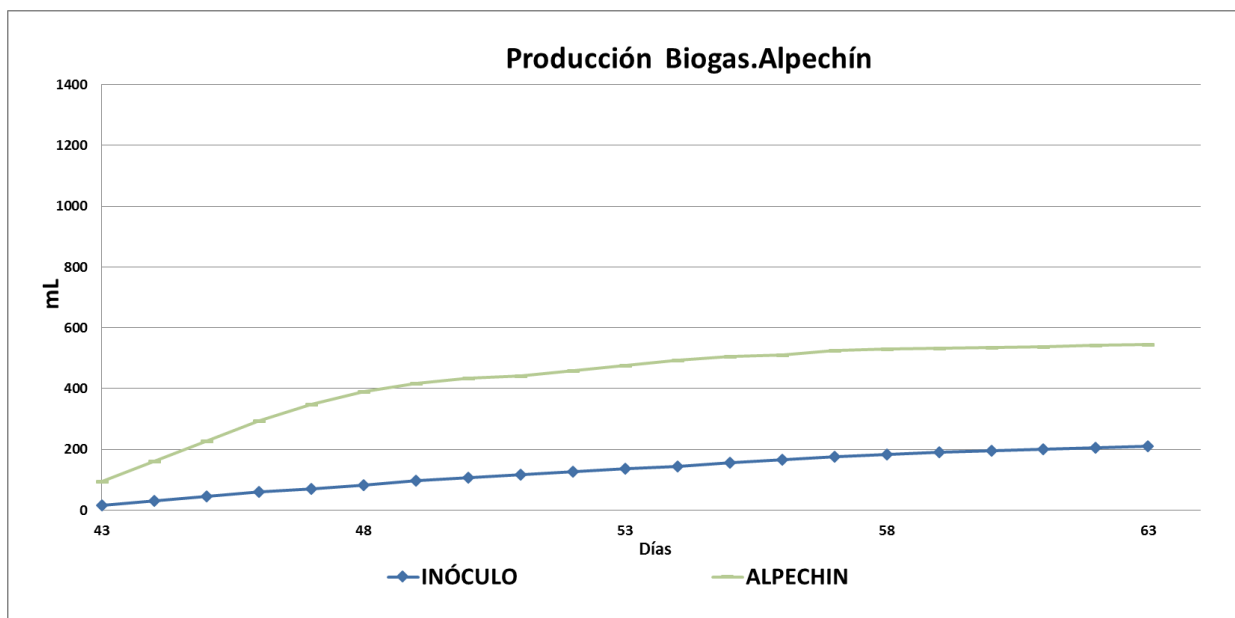
Gráfica 43. Producción Biogás Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

En la **fase 2**, como se puede observar en la gráfica 44. El alpechín presenta un crecimiento exponencial hasta el día 29, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, generando un volumen total de 394 mL.



Gráfica 44. Producción Biogás Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

Tal y como se puede observar en la gráfica 45, respecto a la **fase 3**. El alpechín presenta un crecimiento exponencial hasta el día 48, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, generando un volumen total de 546 mL.



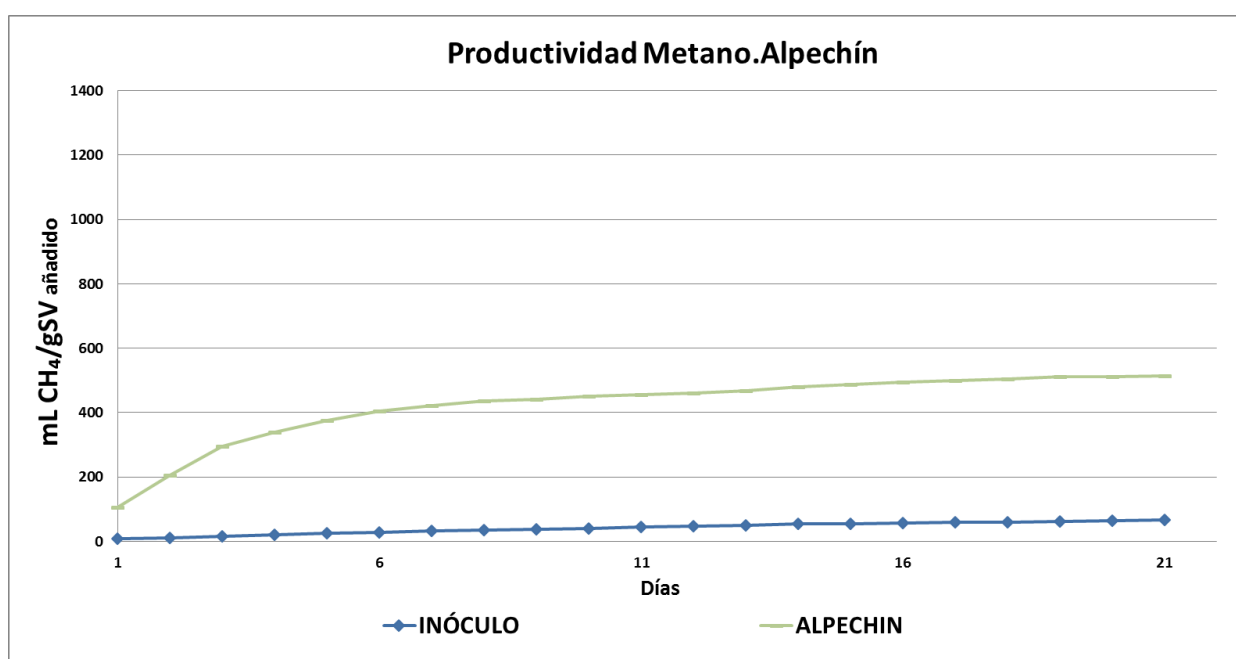
Gráfica 45. Producción Biogás Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3



### 5.1.8.2. Productividad de Metano

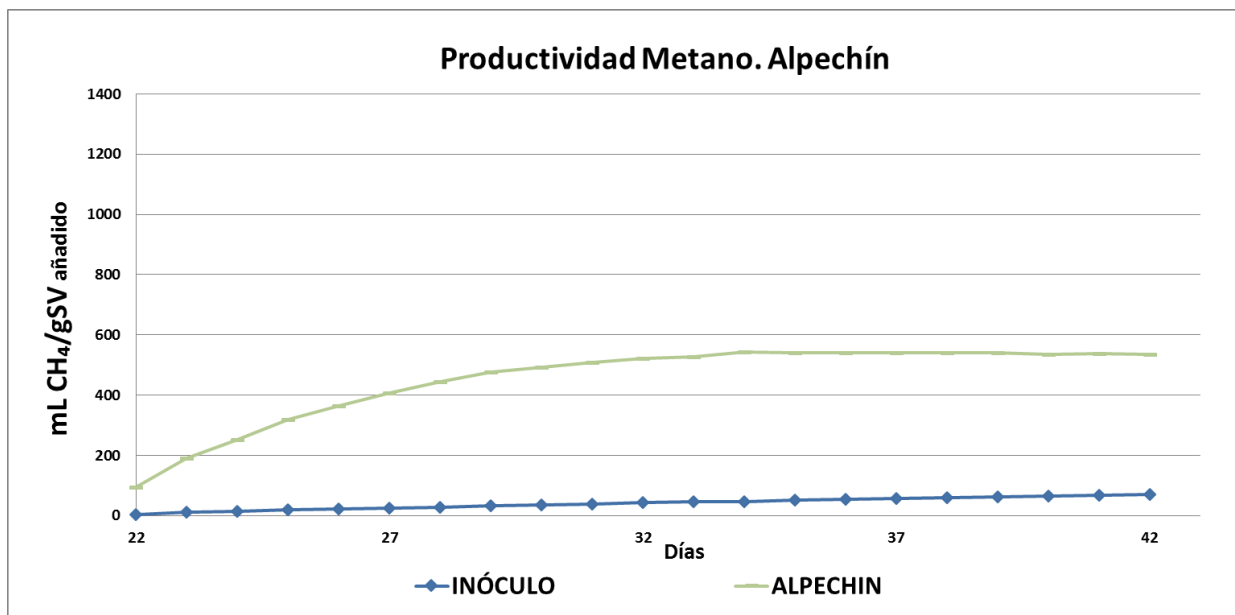
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con alpechín, de las distintas fases temporales.

Tal y como se muestra en la gráfica 46, en la **fase 1** la productividad de metano en el alpechín es de 514 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> y, la productividad del inóculo es de 67 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



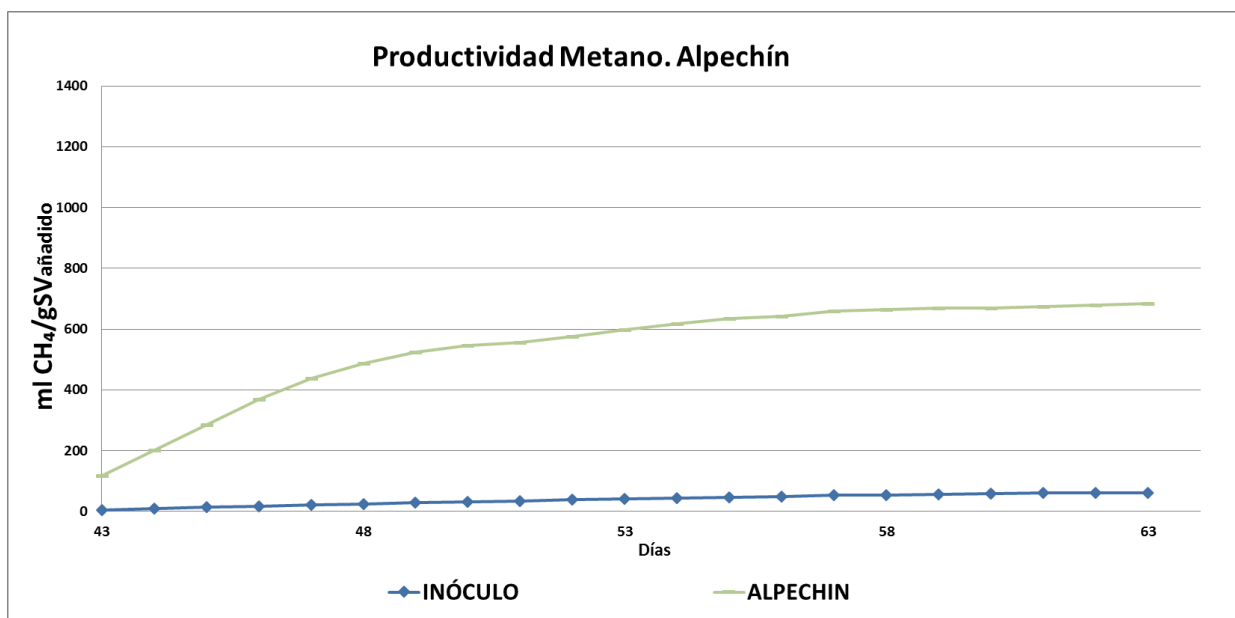
Gráfica 46. Productividad Metano Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

En la **fase 2**, Tal y como se muestra en la gráfica 47 la productividad de metano en el alpechín es de 535 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> y, la productividad del inóculo es de 71 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 47. Productividad Metano Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

En la **fase 3**, la productividad de metano en el alpechín es de 683 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> y, la productividad del inóculo es de 62 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>. Tal y como se observa en la gráfica 48.



Gráfica 48. Productividad Metano Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

#### **5.1.8.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. El porcentaje de metano en el ensayo con alpechín es del 75%, aumentando en un 20% con respecto al ensayo del inóculo (55%).

A la vista de los resultados, la adición de la industria de la fabricación de aceite de oliva (alpechín) en una digestión anaerobia ha conducido a una mejora significativa en la producción de biogás y en la productividad de metano, así como en el porcentaje de metano en el biogás.

### 5.1.9. Ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con Aceite usado de cocina

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con aceite. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1** como se observa en la tabla 26, el aceite presenta una eliminación de DQO del 49%. La eliminación de SV presenta un porcentaje del 38%, siendo superior el porcentaje de eliminación de los ST (46%). Cabe destacar que, el porcentaje de materia volátil se ve incrementado en la salida del ensayo en un 10%.

Tabla 26. Ensayo Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

#### Aceite

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	24.886,14 ±0,74	12.603,33 ±0,77	49
ST	mg L <sup>-1</sup>	24.704,18 ±0,85	13.450,45 ±0,84	46
Materia Seca	%	2,47	1,35	
SV	mg L <sup>-1</sup>	15.986,42 ±0,81	9.980,55 ±0,87	38
Materia Volátil	%	64,71	74,20	
pH		7,00 ±0,01	7,28 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	11,76 ±0,02	11,70 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	5.714,29 ±1,02	6.200,60 ±1,03	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	387,93 ±0,95	250,52 ±1,02	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	465,52 ±0,95	300,32 ±1,02	
Relación AGV/Alcalinidad		0,07	0,04	

Como se observa en la tabla 27, en la **fase 2** el aceite presenta una eliminación de materia orgánica del 52%. Tanto los SV como los ST presentan un porcentaje de eliminación del 50%. Cabe destacar que el porcentaje de materia volátil, es muy similar en la entrada y salida del ensayo. La conductividad aumenta a un  $12,93 \pm 0,02 \text{ mScm}^{-1}$ .

Tabla 27. Ensayo Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

**Aceite**

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$27.320,41 \pm 0,78$	$13.162,36 \pm 0,75$	52
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$26.370,85 \pm 0,80$	$13.150,98 \pm 0,83$	50
Materia Seca	%	2,64	1,32	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$17.800,41 \pm 0,85$	$8.970,15 \pm 0,81$	50
Materia Volátil	%	67,50	68,21	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,40 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$11,76 \pm 0,02$	$12,93 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$5.800,10 \pm 1,04$	$6.600,20 \pm 1,05$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$341,38 \pm 0,90$	$238,62 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$489,66 \pm 0,90$	$286,34 \pm 1,00$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,06	0,04	

En la **fase 3**, como se observa en la tabla 28. El aceite presenta una eliminación de DQO del 51%. El porcentaje de eliminación de los SV y ST es del 41% y 49%, respectivamente. Cabe destacar que el porcentaje de materia volátil es superior a la salida del ensayo, llegando a un 74,48%. La conductividad aumenta en los días que transcurre el ensayo hasta un  $11,70 \pm 0,02 \text{ mScm}^{-1}$ .

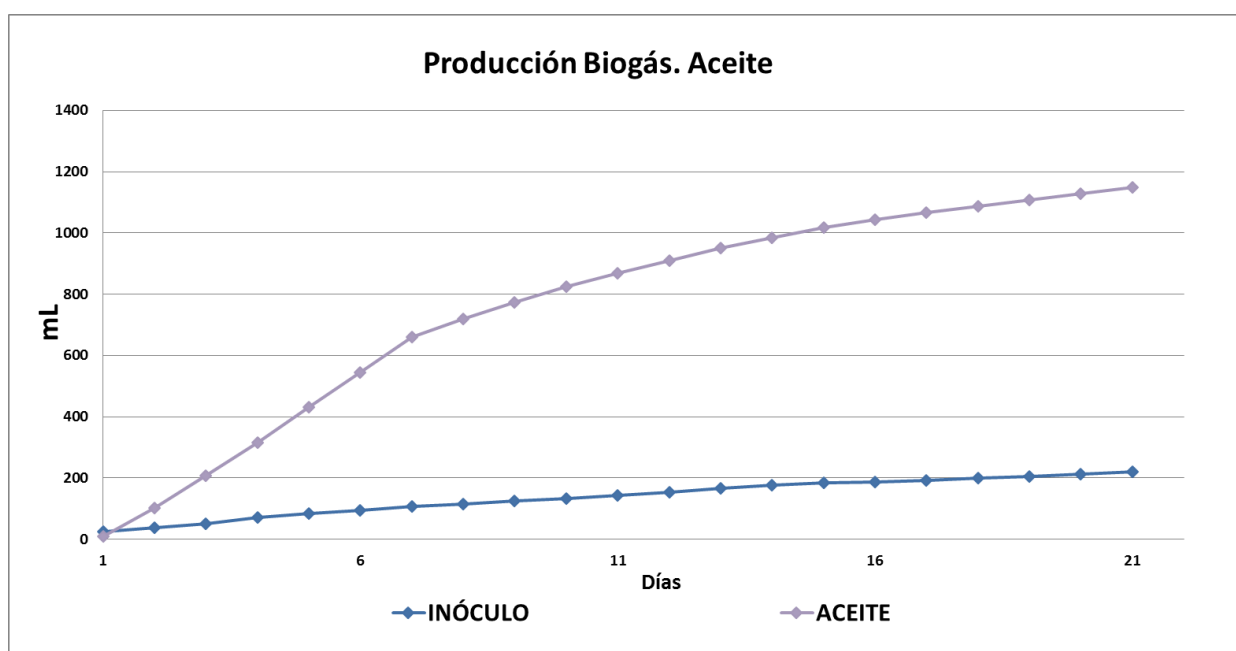
Tabla 28. Ensayo Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

Aceite				
Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$27.220,12 \pm 0,77$	$13.280,02 \pm 0,80$	51
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$24.889,05 \pm 0,85$	$12.645,10 \pm 0,90$	49
Materia Seca	%	2,49	1,26	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$15.984,01 \pm 0,88$	$9.456,12 \pm 0,81$	41
Materia Volátil	%	64,22	74,48	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,28 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$10,50 \pm 0,02$	$11,70 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$5.600,22 \pm 1,05$	$6.650,00 \pm 1,03$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$380,03 \pm 1,02$	$240,12 \pm 0,97$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$456,05 \pm 1,02$	$290,54 \pm 0,97$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,07	0,04	

### 5.1.9.1. Producción de biogás

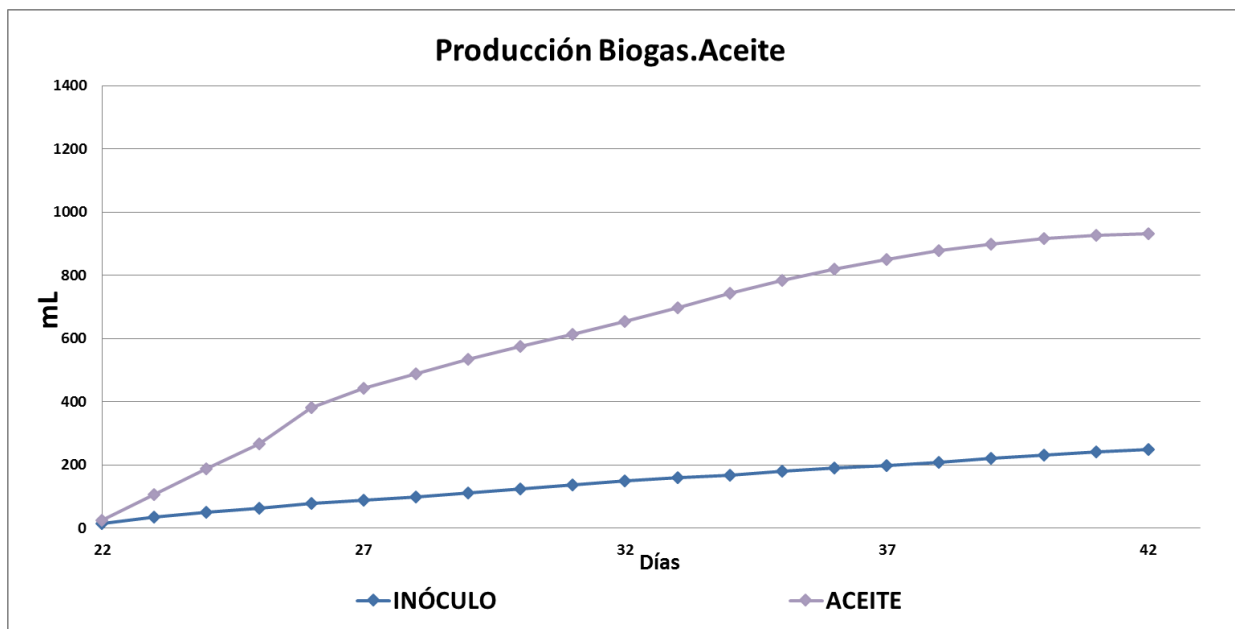
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con aceite. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del aceite.

En la **fase 1**, como se puede observar en la gráfica 49. La producción de biogás del ensayo digestión anaerobia mono-sustrato con aceite presenta un crecimiento exponencial hasta el día 7, a partir del cual, este crecimiento no es tan notorio. Tras los 21 días de ensayo, no presenta una estabilización. La producción total de biogás es de 1.149 mL



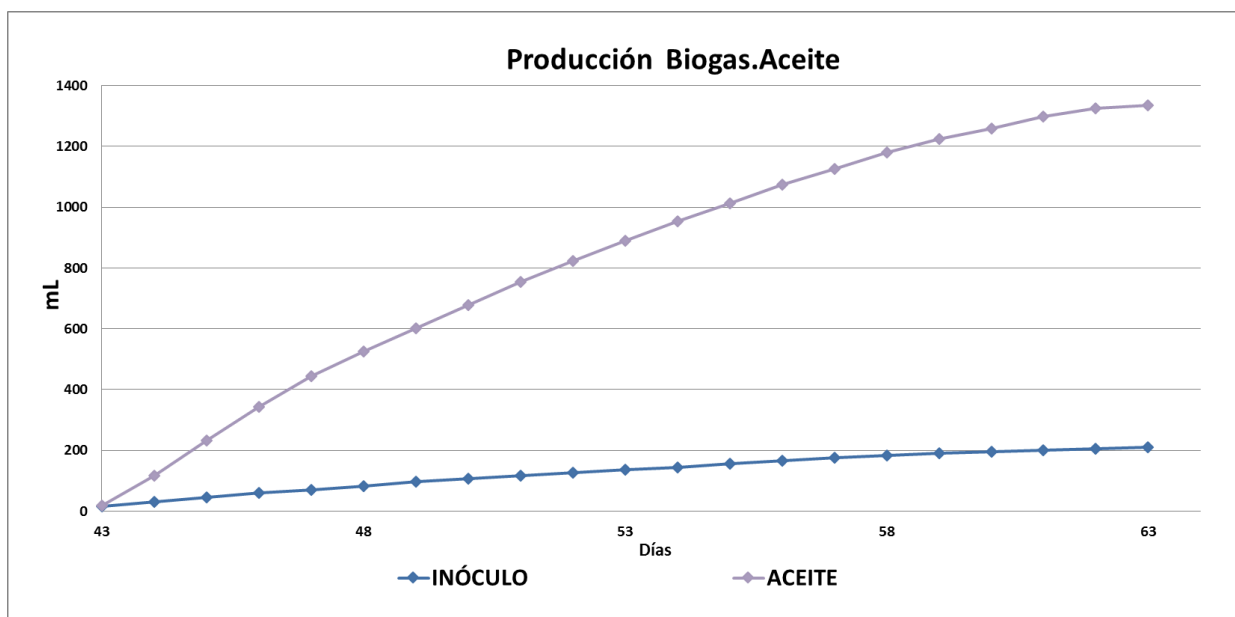
Gráfica 49. Producción Biogás Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

Como se muestra en la gráfica 50 de la **fase 2**, el ensayo con aceite presenta un crecimiento exponencial hasta el día 26, estabilizándose a partir del día 39. La producción total de biogás es de 933 mL y, con respecto al inóculo incrementa la producción de biogás en 675 mL.



Gráfica 50. Producción Biogás Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

Como se puede observar en la gráfica 51, respecto a la **fase 3**. El aceite presenta un crecimiento exponencial hasta el día 62. Tras los días que dura el ensayo, no presenta una estabilización. La producción total de biogás es de 1.335 mL Con respecto al inóculo (209mL) incrementa la producción de biogás en 1.126 mL.



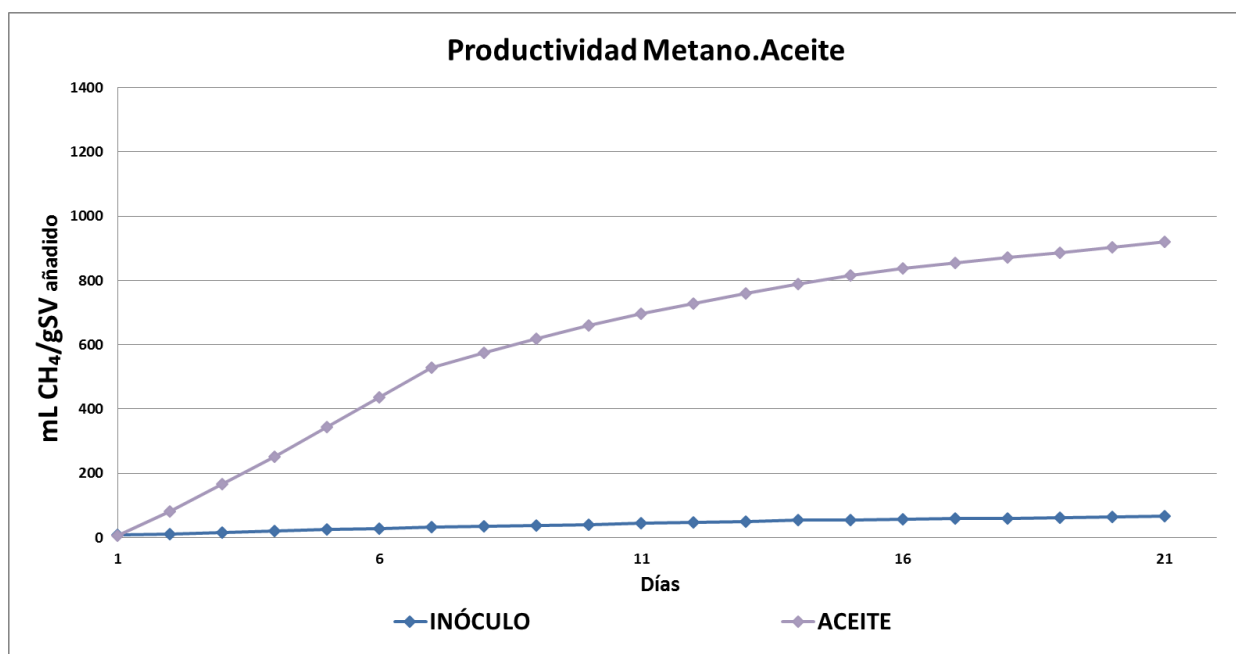
Gráfica 51. Producción Biogás Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3



### 5.1.9.2. Productividad de Metano

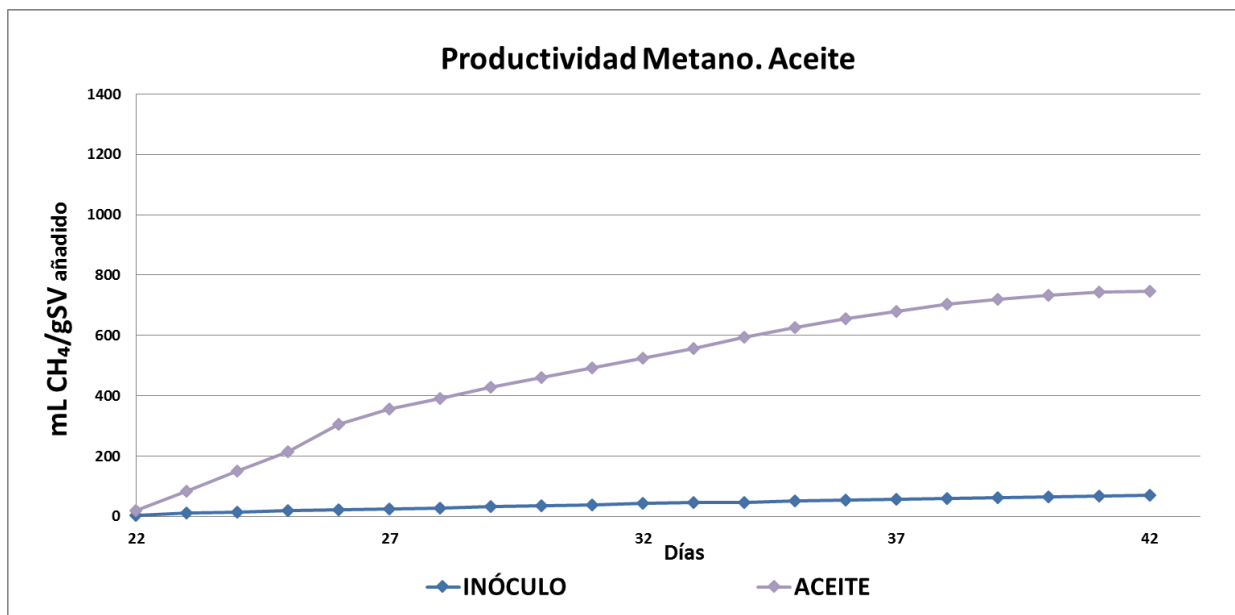
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con aceite, de las distintas fases temporales.

En la **fase 1**, el aceite presenta una productividad de 920 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.tal y como se observa en la gráfica 52.



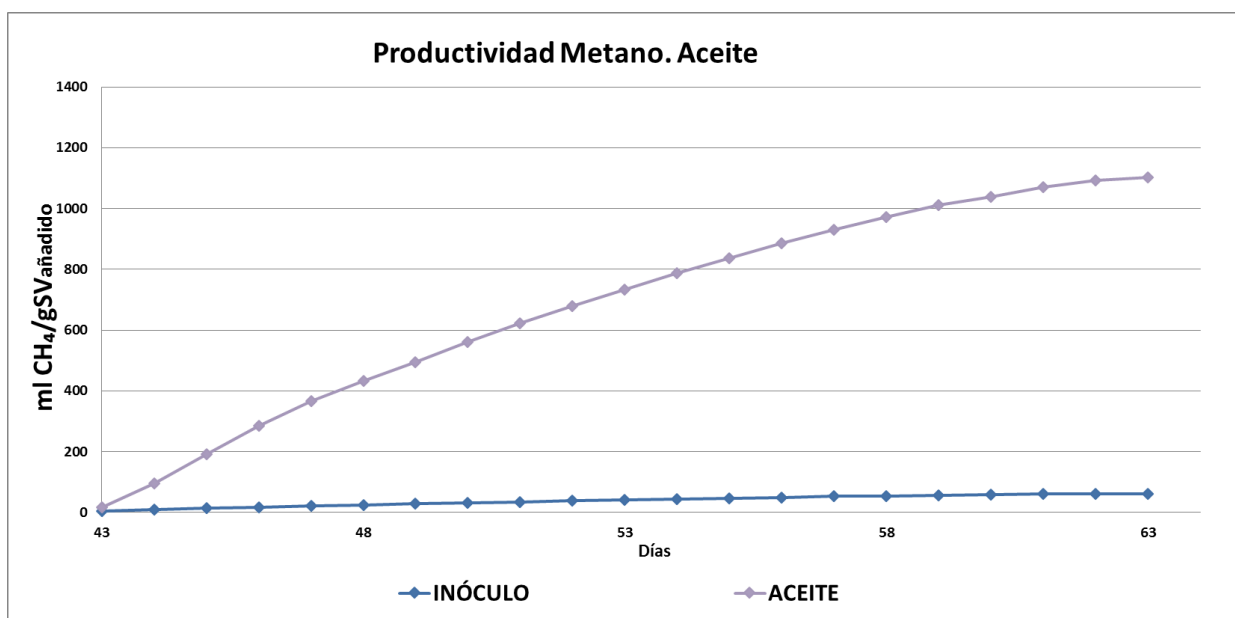
Gráfica 52. Productividad Metano Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

En la fase 2, tal y como se observa en la gráfica 53. El aceite presenta una productividad de 748 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 53. Productividad Metano Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

En la **fase 3**, como se observa en la gráfica 54 el ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con aceite presenta una productividad de 1.101 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 54. Productividad Metano Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

### **5.1.9.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que similar en todas las fases, siendo superior en la fase 3. En la fase 1 y 2 el porcentaje es del 68% y en la fase 3 es del 70%, un 15% superior respecto al ensayo del inóculo (55%).

A la vista de los resultados, la adición del aceite en una digestión anaerobia ha conducido a una mejora significativa en la producción de biogás y en la productividad de metano.

### **5.1.10.Comparación de la digestión mono-sustrato de los diferentes residuos orgánicos estudiados.**

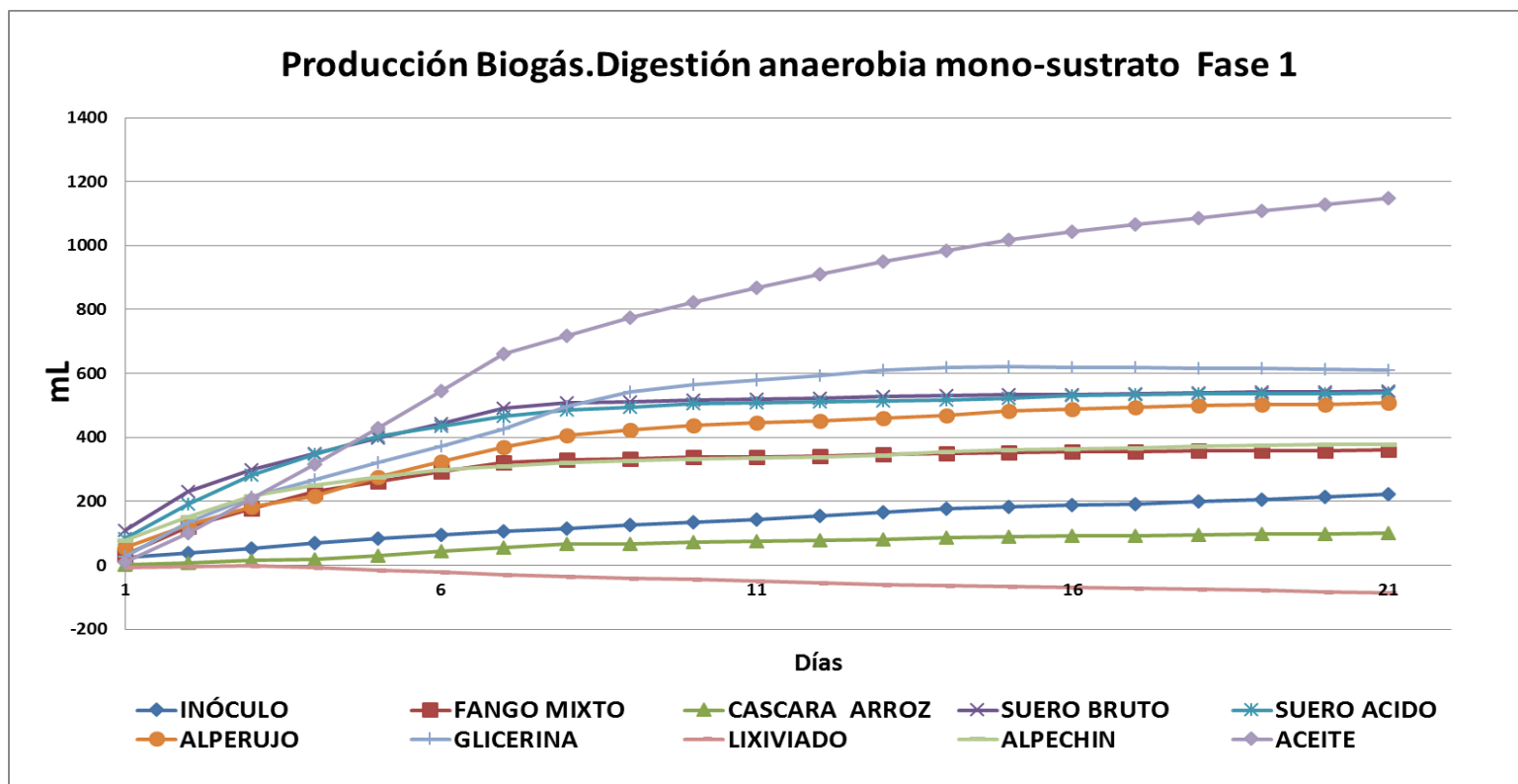
#### **5.1.10.1. Comparación de la digestión mono-sustrato de los diferentes residuos orgánicos estudiados Fase 1 (21 Días)**

Las curvas de **producción de biogás** correspondientes a los ensayos de digestión mono-sustrato con respecto a la fase 1 de los diferentes residuos, se ha representado en la gráfica 55. Se puede observar que, el aceite de cocina usado, es el que presenta mayor producción de biogás con 1.149 mL, seguido de las aguas de glicerina con 611 mL. Los residuos de la industria láctea tienen una producción de biogás total similar, en torno a 540 mL. El alperujo genera 508 mL, sin embargo, el otro residuo de la industria del aceite de oliva (alpechín) genera 379 mL, un dato similar al fango mixto (361 mL).

Todos los residuos citados anteriormente tienen una producción de biogás superior al inóculo (221 mL). Sin embargo, la cascara de arroz (99 mL) y el lixiviado están por debajo, siendo negativo respecto al inóculo inicial.

En términos de **eliminación de materia orgánica**, como se puede observar en la tabla 29, todos los residuos presentan una eliminación de materia orgánica por encima del inóculo, siendo muy significativo el porcentaje de eliminación del suero ácido (60%). En el caso del lixiviado y el fango mixto tienen un porcentaje de eliminación de DQO del 44%, siendo los residuos que presentan el menor porcentaje de eliminación.

En cuanto a los datos obtenidos de **eliminación de sólidos**, cabe destacar el bajo porcentaje de eliminación de sólidos tanto totales como volátiles del lixiviado (14% y 17% respectivamente). Por el contrario, el aceite usado de cocina es el residuo que presenta un mayor porcentaje de eliminación de ST (49%) y, el residuo que muestra un mayor porcentaje de eliminación de SV es el fango mixto (41%). Tal y como se muestra en la tabla 29.



Gráfica 55. Producción Biogás. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

Tabla 29. Porcentaje Eliminación y Producción de Biogás. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

		Inóculo	Fango mixto	Cascara arroz	Suero bruto	Suero ácido	Alperujo	Glicerina	Lixiviado	Alpechín	Aceite
<b>DQO</b>	%	25	44	59	52	60	47	49	44	51	49
<b>ST</b>	%	18	33	38	23	34	30	23	14	26	46
<b>SV</b>	%	27	41	33	32	34	32	34	17	29	38
<b>Producción de Biogás</b>	mL	221	361	99	544	539	508	611	-86	379	1149

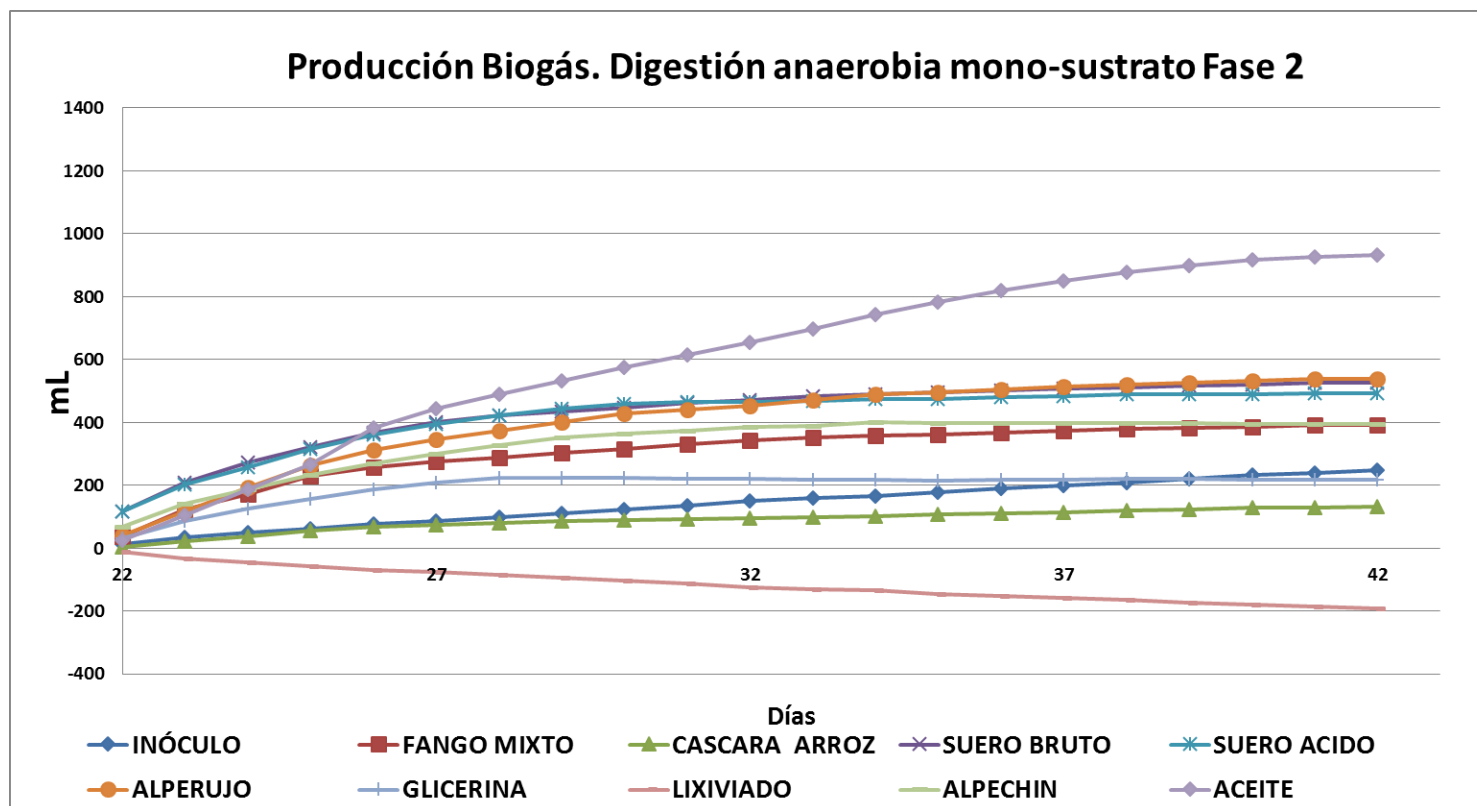
#### 5.1.10.2. Comparación de la digestión mono-sustrato de los diferentes residuos orgánicos estudiados. Fase 2 (42 Días)

La **producción de biogás** correspondientes a los ensayos de digestión mono-sustrato con respecto a la fase 2 de los diferentes residuos, con fango adaptado a los residuos procedentes de la fase 1, se han representado en la gráfica 56. Se puede observar claramente que, el aceite usado de cocina es el que presenta mayor producción de biogás 933 mL, seguido por el alperujo (539 mL) y el suero bruto (528 mL). El suero ácido genera 491 mL. El lodo de depuradora (Fango Mixto) y el alpechín tienen una producción de biogás similar 394 mL y 393 mL respectivamente.

Todos los residuos anteriores producen más que el inóculo (249 mL). Sin embargo, la cascara de arroz (131 mL), el lixiviado y las aguas de glicerina (218 mL) están por debajo, siendo negativo respecto al inóculo inicial.

Con respecto a la **eliminación de materia orgánica**, se puede observar en la tabla 30, que todos los residuos presentan una eliminación de materia orgánica por encima del inóculo, siendo muy significativo el porcentaje de eliminación de los residuos de la industria láctea, el alperujo y el aceite usado de cocina, los cuales presentan una eliminación muy similar, alrededor del 55%.

En términos de **eliminación de sólidos**, es importante mencionar que las aguas glicerosas y el lixiviado tienen un bajo porcentaje de eliminación de sólidos volátiles del (16% y 17% respectivamente), esto puede asociarse a la producción de biomasa bacteriana en el proceso.



Gráfica 56. Producción Biogás. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

Tabla 30. Porcentaje Eliminación y Producción de Biogás. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

		Inóculo	Fango mixto	Cascara arroz	Suero bruto	Suero ácido	Alperujo	Glicerina	Lixiviado	Alpechín	Aceite
<b>DQO</b>	%	20	45	45	56	54	53	45	30	43	52
<b>ST</b>	%	29	50	53	26	41	33	20	16	21	50
<b>SV</b>	%	34	53	56	37	49	39	16	17	43	50
<b>Producción de Biogás</b>	mL	249	393	131	528	491	539	218	-191	394	933

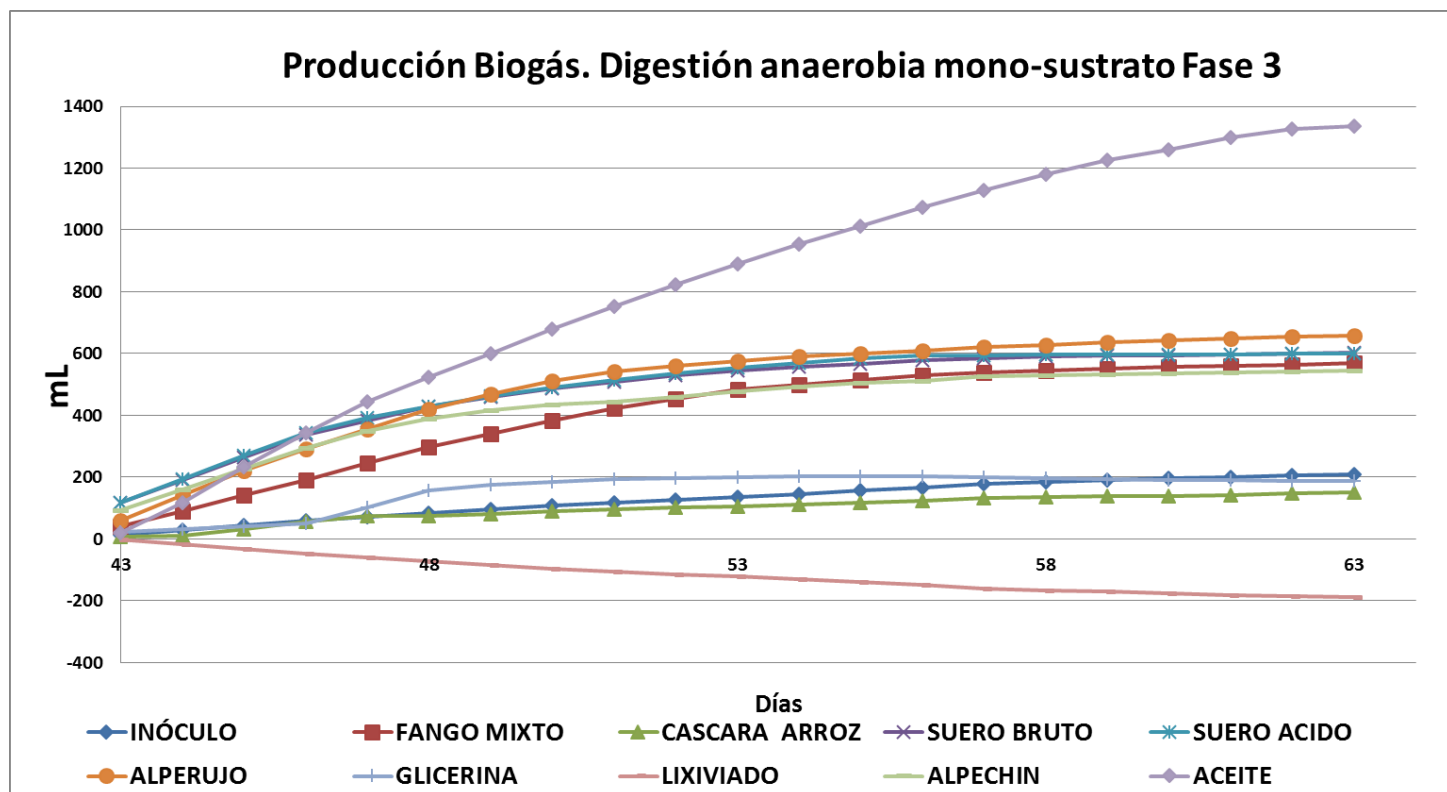
### **5.1.10.3. Comparación de la digestión mono-sustrato de los diferentes residuos orgánicos estudiados. Fase 3 (63 Días)**

**La producción de biogás** correspondientes a los ensayos de mono-digestión con respecto a la fase 3 de los diferentes residuos, con fango adaptado a los residuos procedentes de la fase 2, se han representado en la gráfica 57. Se puede observar claramente que, el aceite usado de cocina es el que presenta mayor producción de biogás 1.335 mL, seguido por el alperujo 657 mL. Los residuos de la industria láctea tienen una producción similar, en torno a 600 mL. El lodo de depuradora (Fango Mixto) y el alpechín tienen una producción de biogás similar 569 mL y 546 mL respectivamente. Todos los residuos anteriores producen más que el inóculo (209mL), sin embargo, la cascara de arroz, el lixiviado y las aguas de glicerina están por debajo, siendo negativo en el lixiviado.

En términos de **eliminación de materia orgánica**, como se puede observar en la tabla 31, todos los residuos presentan una eliminación de DQO por encima del inóculo, siendo muy significativo el porcentaje de eliminación del suero bruto y alperujo (54%). Cabe destacar que ensayo con la cascara de arroz tiene una eliminación del 44%.

Con respecto a la **eliminación de sólidos**, como se puede observar en la tabla 31, cabe destacar el bajo porcentaje de eliminación de sólidos tanto totales como volátiles del lixiviado (21% y 23% respectivamente), que puede asociarse a la producción de biomasa bacteriana en el proceso. Por el contrario, el aceite de cocina usado es el residuo que presenta un mayor porcentaje de eliminación de ST (49%) y, el residuo que muestra un mayor porcentaje de eliminación de SV es el fango mixto (55%).



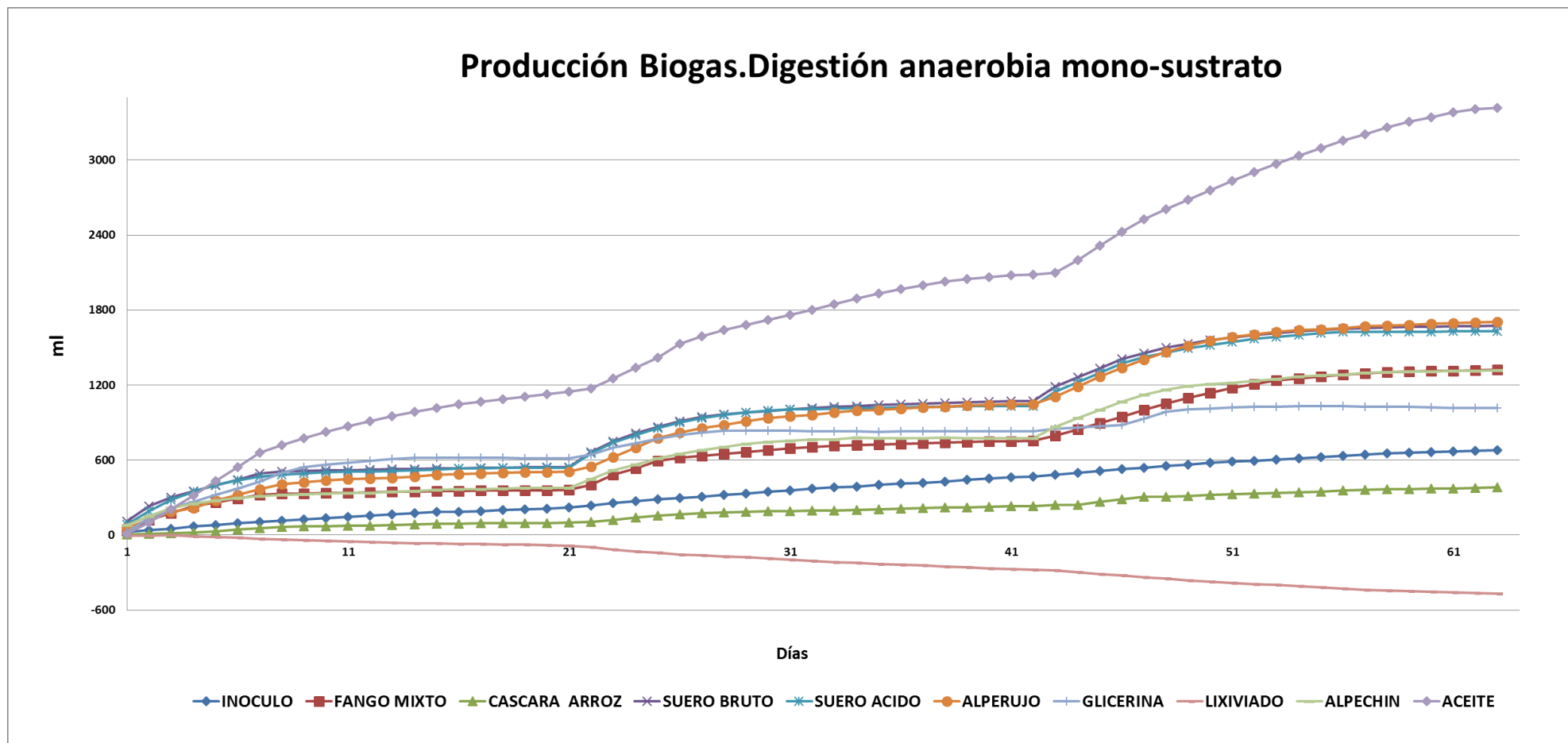


Gráfica 57. Producción Biogás. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

Tabla 31. Porcentaje Eliminación y Producción de Biogás. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

		Inóculo	Fango mixto	Cascara arroz	Suero bruto	Suero ácido	Alperujo	Glicerina	Lixiviado	Alpechín	Aceite
<b>DQO</b>	%	25	47	44	54	53	54	46	36	52	51
<b>ST</b>	%	29	48	43	45	42	39	24	21	36	49
<b>SV</b>	%	40	55	40	45	51	39	23	23	48	41
<b>Producción de Biogás</b>	mL	209	569	151	603	600	657	187	-189	546	1335

#### 5.1.10.4. Comparación ensayo digestión mono-sustrato de los diferentes residuos orgánicos estudiados. Fase (1, 2 y 3)



Gráfica 58. Producción Biogás Digestión anaerobia mono-sustrato

Tabla 32. Producción de Biogás. Digestión anaerobia mono-sustrato

<b>Producción Biogás</b>	<b>Inóculo</b>	<b>Fango mixto</b>	<b>Cascara arroz</b>	<b>Suero bruto</b>	<b>Suero ácido</b>	<b>Alperujo</b>	<b>Glicerina</b>	<b>Lixiviado</b>	<b>Alpechín</b>	<b>Aceite</b>
<b>Fase 1</b>	221	361	99	544	539	508	611	-86	379	1149
<b>Fase 2</b>	249	393	131	528	491	539	218	-191	394	933
<b>Fase 3</b>	209	569	151	603	600	657	187	-189	546	1335
<b>Producción Total</b>	678	1323	382	1675	1631	1704	1016	-467	1319	3417

Es interesante destacar cómo evoluciona la cascara de arroz, la cual va mejorando con cada fase temporal de ensayo. Esto sugiere que la hidrólisis es lenta y poco a poco va mejorando el rendimiento, cuando va avanzando ésta. Esto es coherente con las investigaciones sobre pretratamientos previos para residuos sólidos (Gonçalves Liliana, 2013).

Los residuos de la industria láctea (suero bruto y suero ácido) poseen un comportamiento similar. Ambos presentan un buen arranque en la producción de biogás, la cual va mejorando con cada fase temporal de ensayo. En el caso del suero ácido, no afecta su acidez a los microorganismos presentes en el digestor debido a su buena alcalinidad.

Dentro de los residuos procedentes de la fabricación de aceite de oliva, el residuo sólido (alperujo) tiene una producción de biogás mayor que el alpechín (residuo líquido) debido a su alta carga orgánica.

El alpechín en las dos primeras fases temporal de ensayo presenta una producción de biogás similar, está aumenta en la tercera fase en un 28%, tal y como se puede observar en la tabla 32. Cabe destacar que el alperujo tiene una producción de biogás estable en las tres fases temporal del ensayo, viéndose aumentada en la última.

Las aguas de glicerina, procedentes de la fabricación de biodiesel, presentan un buen arranque en la producción de biogás en digestión anaerobia. Sin embargo, a medida que transcurre el ensayo la producción de biogás disminuye drásticamente entorno a un 70%. Por lo tanto, las aguas glicerosas estudiadas, presentan problemas de estabilidad en el proceso de digestión anaerobia.

El lixiviado es un residuo bastante complejo, ya que su composición varía según las características de los residuos sólidos urbanos. Se trata de un residuo de difícil tratamiento en una digestión anaerobia. Tal y como se puede observar en la tabla 32, la producción de biogás es negativa debido a que el ensayo con este residuo tiene una producción por debajo del blanco (inóculo). A medida que va transcurriendo las fases temporales del ensayo la producción de biogás va disminuyendo. Con los resultados obtenidos en esta investigación descrita hasta el momento, presenta un desafío de futuro en la gestión integral de residuos sólidos y líquidos urbanos. En los próximos capítulos de esta tesis, se aborda este reto con unos resultados previos interesantes.

El aceite usado de cocina presenta una buena digestibilidad, siendo el más productivo de todos los residuos estudiados en la digestión anaerobia. Tal y como se observa en la tabla 32, al comparar las tres fases temporales del ensayo, presenta una disminución en la producción de biogás en la fase 2. A pesar de ello en la fase tres la producción de biogás aumenta, siendo la fase más productiva de todas de este residuo.

#### **5.1.11. Conclusiones ensayo digestión anaerobia mono-sustrato**

En este apartado se presentan las conclusiones obtenidas en base a los resultados y a las consideraciones anteriormente explicadas.

Este trabajo demuestra que la tecnología BMP discierne eficazmente la viabilidad de los distintos residuos agroalimentarios e industriales de alta carga orgánica.

En general, los residuos agroalimentarios son factibles para su aprovechamiento energético y gestión de residuos en digestión anaerobia (mono-sustrato). La digestión anaerobia de residuos es viable en la mayoría de los sustratos orgánicos estudiados, siendo inestable en el ensayo de aguas de glicerina y, la cascara de arroz donde es difícil de biodegradar. Y por último, el lixiviado que es bastante compleja su tratabilidad.

Tras los resultados obtenidos, es necesario ensayar mezclas con fangos mixtos para ver la mejora de la gestión de residuos y la productividad de biogás en una EDAR, tal y como se refleja en el ensayo siguiente.

## **5.2. Ensayo de Co-digestión anaerobia de Fango mixto y residuos orgánicos.**

Con el fin de determinar la viabilidad de los residuos en una co-digestión anaerobia y estudiar la producción de biogás y metano y, la biodegradabilidad. Se ha estudiado la complementariedad de los residuos con el lodo de depuradora, se han realizado test co-digestión. En todos los casos se han utilizado las mismas condiciones experimentales.

- Ensayo co-digestión de Fango Mixto y Cascara Arroz (Industria Agroalimentaria)
- Ensayo co-digestión de Fango Mixto y Suero Bruto (Industria láctea)
- Ensayo co-digestión de Fango Mixto y Suero Ácido (Industria láctea)
- Ensayo co-digestión de Fango Mixto y Alperujo (Industria fabricación aceite de oliva)
- Ensayo co-digestión de Fango Mixto y Aguas de Glicerina (Industria biodiesel)
- Ensayo co-digestión de Fango Mixto y lixiviado
- Ensayo co-digestión de Fango Mixto y Alpechín (Industria fabricación aceite de oliva)
- Ensayo co-digestión de Fango Mixto y Aceite

### **Residuos**

De tabla 115 a la 120 del anexo II, se muestran los resultados de las analíticas de laboratorio llevadas a cabo con el fin de determinar las características de los residuos empleados en este trabajo. Con respecto a las analíticas, se ha seguido la metodología descrita en el capítulo 4. Como se recoge en dicha tabla, los residuos utilizados poseen unas características significativamente diferentes puesto que existe cierta variabilidad entre los resultados analíticos obtenidos para cada uno de ellos.

### **Inóculo**

Para realizar el ensayo BMP, se utilizó como fuente de biomasa metanogénica activa fango digerido extraído de los digestores de la EDAR que trata las aguas residuales urbanas de la comarca sur de Sevilla. Su composición se muestra en la tabla 121, anexo II.

Para las fases 2 y 3 se ha utilizado como inóculo fango adaptado procedentes de los ensayos BMP de las fase anterior. Las características analíticas se muestran en la tabla 122-123, anexo II.

### 5.2.1. Ensayo Co-digestión de Fango Mixto y Cascara de Arroz

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de digestión anaerobia mono-sustrato con suero ácido. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la tabla 33, respecto a la **fase 1** se observa que el ensayo con la mezcla del fango mixto y la cascara de arroz presenta una eliminación de DQO del 41%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 25% y, el de sólidos volátiles presenta una eliminación del 22%. El pH, disminuye durante los 21 días del ensayo. Cabe destacar que la alcalinidad presenta un incremento a la salida del ensayo hasta un  $6.300,00 \pm 1,09 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$  y, un aumento de la materia volátil cerca del 3%.

Tabla 33. Ensayo FM-Cascara Arroz, Co-digestión Fase 1

#### Fango Mixto-Cascara Arroz

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$24.870,78 \pm 0,72$	$14.593,54 \pm 0,77$	41
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$19.455,64 \pm 0,81$	$14.500,31 \pm 0,85$	25
Materia Seca	%	1,95	1,45	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$12.870,13 \pm 0,76$	$10.000,16 \pm 0,79$	22
Materia Volátil	%	66,15	68,97	
pH		$8,16 \pm 0,01$	$7,62 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$6.913,00 \pm 0,02$	$12,42 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.877,55 \pm 1,05$	$6.300,00 \pm 1,09$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$384,48 \pm 0,98$	$113,28 \pm 1,03$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$461,38 \pm 0,98$	$135,93 \pm 1,03$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,10	0,02	



En la **fase 2**, tal y como se observa en la tabla 34. La mezcla del fango mixto con la cascara de arroz presenta una eliminación de DQO del 46%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 39% y, el de sólidos volátiles presenta una eliminación del 33%. El pH, disminuye durante el ensayo. Cabe destacar que la alcalinidad presenta un incremento a la salida del ensayo hasta un  $6.500,74 \pm 1,06 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$  y, un aumento de la materia volátil entorno al 5,5%.

Tabla 34. Ensayo FM-Cascara Arroz, Co-digestión Fase 2

#### Fango Mixto-Cascara Arroz

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$23.378,65 \pm 0,71$	$12.689,11 \pm 0,75$	46
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$20.025,22 \pm 0,82$	$12.279,85 \pm 0,86$	39
Materia Seca	%	2,00	1,23	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$11.645,32 \pm 0,87$	$7.789,45 \pm 0,90$	33
Materia Volátil	%	58,15	63,43	
pH		$7,84 \pm 0,01$	$7,62 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$7,14 \pm 0,02$	$12,42 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.100,61 \pm 1,01$	$6.500,74 \pm 1,06$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$380,78 \pm 1,03$	$240,41 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$455,89 \pm 1,03$	$288,20 \pm 1,00$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,09	0,04	

Como se observa en la tabla 35 respecto a la **fase 3**, la mezcla del fango mixto con la cascara de arroz presenta una eliminación de materia orgánica del 47%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 32% y, el de sólidos volátiles presenta una eliminación del 34%. El pH, disminuye durante los días del ensayo. Cabe destacar que la alcalinidad presenta un incremento a la salida del ensayo hasta un  $7.200,41 \pm 1,03 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ .

Tabla 35. Ensayo FM-Cascara Arroz, Co-digestión Fase 3

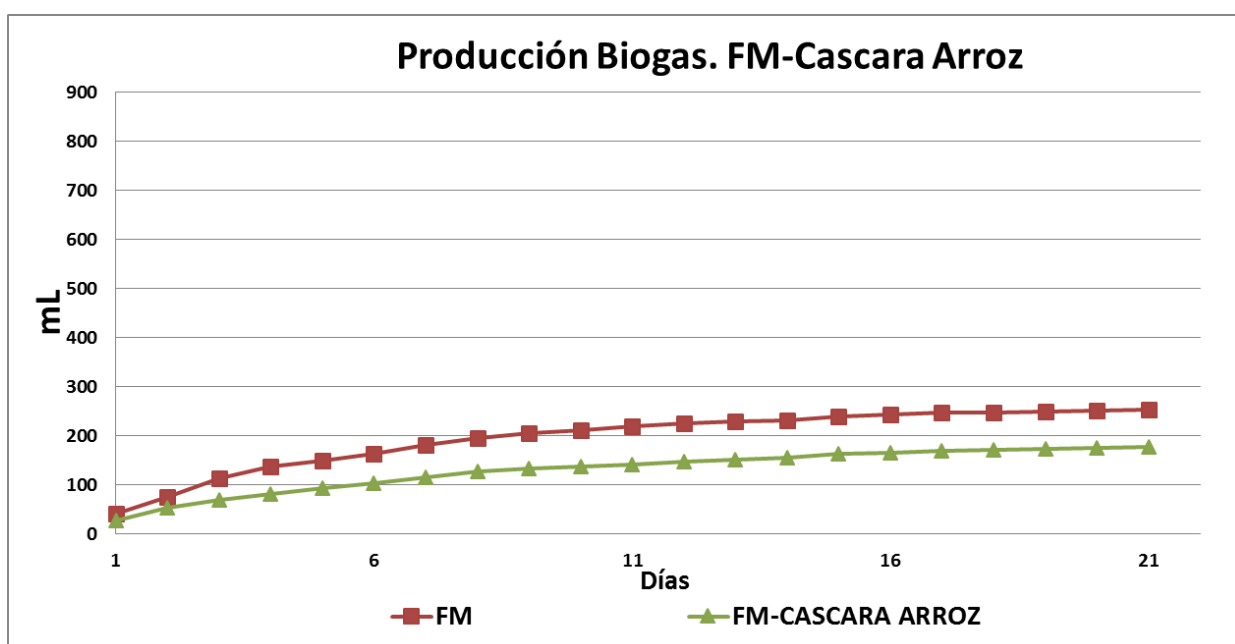
#### Fango Mixto-Cascara Arroz

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$24.320,03 \pm 0,78$	$12.950,09 \pm 0,80$	47
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$21.020,11 \pm 0,80$	$14.200,21 \pm 0,83$	32
Materia Seca	%	2,10	1,42	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$12.340,33 \pm 0,85$	$8.120,44 \pm 0,90$	34
Materia Volátil	%	58,71	57,18	
pH		$7,84 \pm 0,01$	$7,62 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$7,14 \pm 0,02$	$12,42 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.081,63 \pm 1,00$	$7.200,41 \pm 1,03$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$408,62 \pm 0,93$	$310,21 \pm 0,98$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$490,34 \pm 0,93$	$372,30 \pm 0,98$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,10	0,04	

### 5.2.1.1. Producción de Biogás

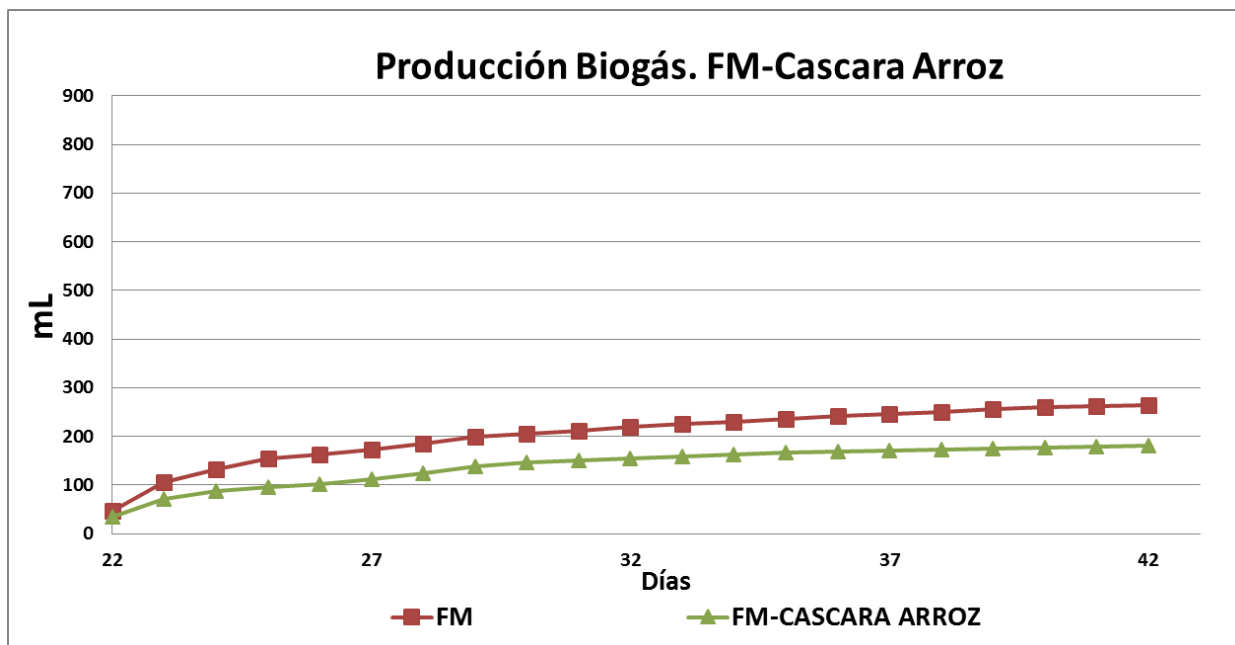
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de co-digestión anaerobia con fango mixto y cascara de arroz. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de fango mixto y cascara de arroz.

Como se representa en la gráfica 59 respecto a la **fase 1**, la adición de la mezcla de FM-Cascara no aumenta la producción de biogás, presentando un crecimiento similar al fango mixto. El fango mixto (253 mL) produce 77 mL de biogás más que el ensayo de fango mixto y cascara de arroz que tan solo produce 176 mL.



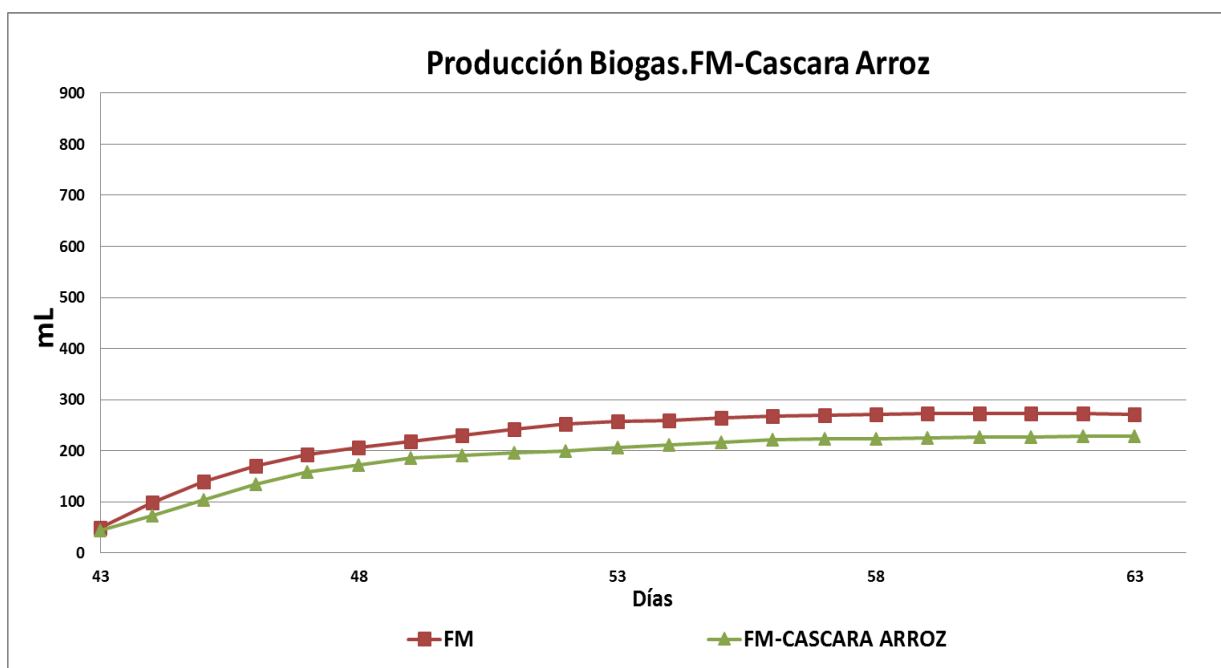
Gráfica 59. Producción Biogás FM-Cascara Arroz, Co-digestión Fase 1

En la **fase 2**, la adición de la mezcla de fango mixto y cascara de arroz no aumenta la producción de biogás, presentando un crecimiento similar al fango mixto. El fango mixto (263 mL) produce 82 mL de biogás más que el ensayo de fango mixto y cascara de arroz que tan solo produce 181 mL, tal y como se puede observar en la gráfica 60.



Gráfica 60. Producción Biogás FM-Cascara Arroz, Co-digestión Fase 2

Como se representa en la gráfica 70 de la **fase 3** del ensayo de co-digestión de fango mixto y cascara de arroz. La adición de la mezcla de FM-Cascara de arroz disminuye la producción de biogás, presentando un crecimiento similar al fango mixto. El fango mixto (272 mL) produce 43 mL de biogás más que FM-Cascara de arroz que tan solo produce 229 mL

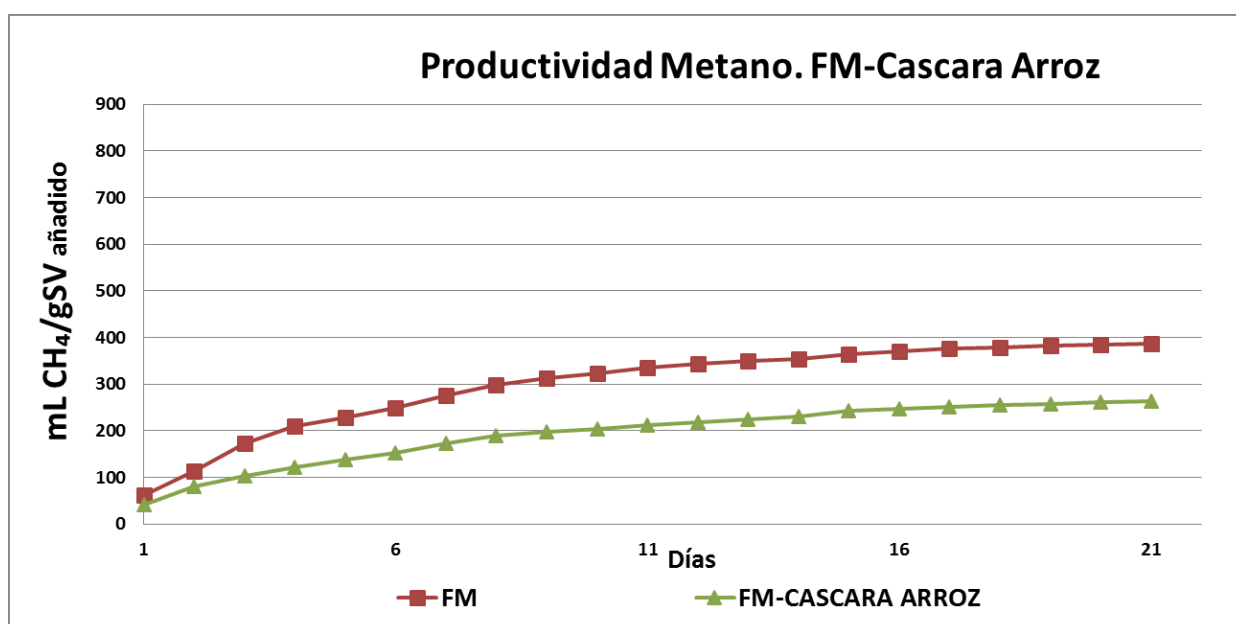


Gráfica 61. Producción Biogás FM-Cascara Arroz, Co-digestión Fase 3

### 5.2.1.2. Productividad de Metano

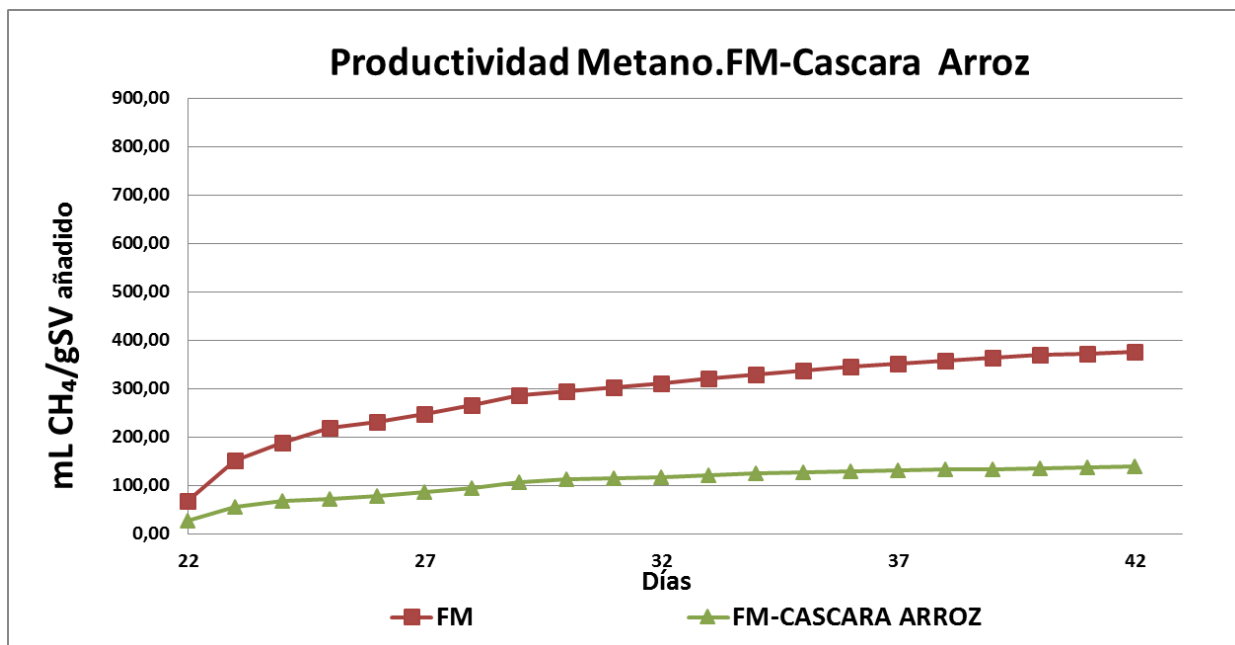
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y cascara de arroz, de las distintas fases temporales.

En la **fase 1** con respecto a la productividad de metano, el fango mixto produce un total de 386 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> y la mezcla FM-Cascara 261 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>. Tal y como se observa en la gráfica 62.



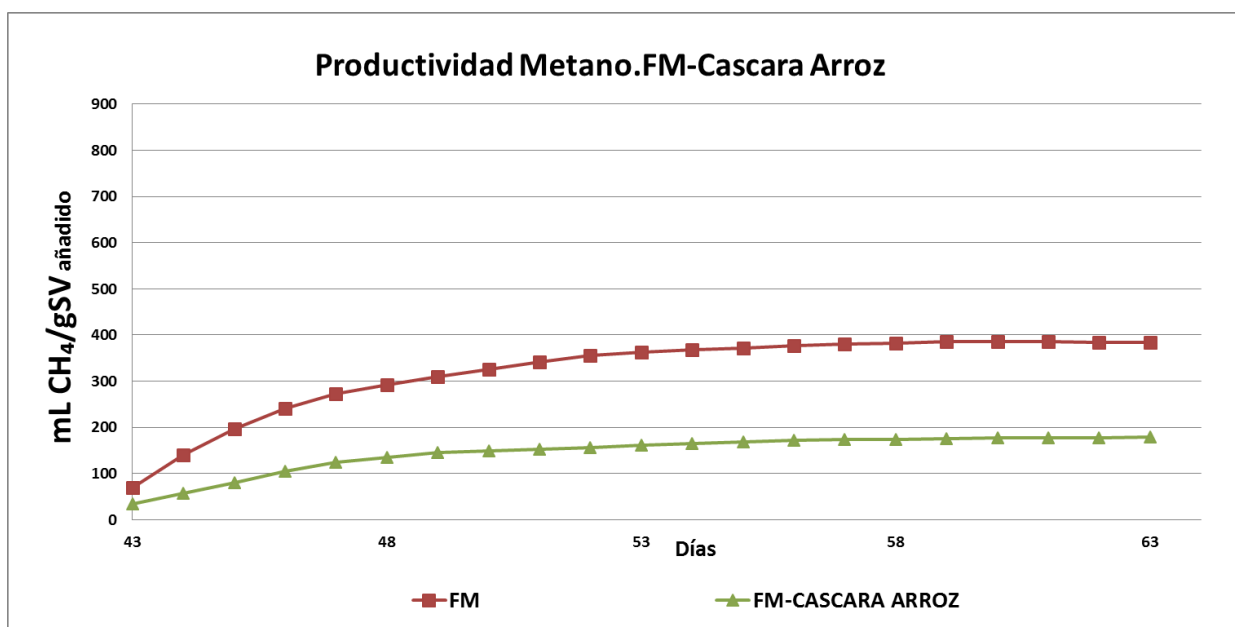
Gráfica 62. Productividad Metano FM-Cascara Arroz, Co-digestión Fase 1

En la **fase 2**, tal y como se puede observar en la gráfica 63. El fango mixto tiene una productividad de metano total de 375 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> y la mezcla FM-Cascara 139 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 63. Productividad Metano FM-Cascara Arroz, Co-digestión Fase 2

Con respecto a la productividad de metano en la **fase 3**, como se observa en la gráfica 64. El fango mixto tiene una productividad de metano total de 384 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> y la mezcla FM-Cascara 178 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 64. Productividad Metano FM-Cascara Arroz, Co-digestión. Fase 3

#### **5.2.1.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. En la primera fase el porcentaje de metano en el ensayo con la mezcla FM-Cascara es del 70%, un 5% menor con respecto al ensayo del fango mixto (75%). En la última fase el porcentaje de metano en el ensayo con la mezcla FM-Cascara es del 70%, al igual que el ensayo del fango mixto (70%).

A la vista de los resultados, la adición de la mezcla FM-Cascara en una co-digestión anaerobia ha conducido a una disminución en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al fango mixto. Esto sugiere que la hidrólisis de la cascara de arroz es lenta y poco a poco va mejorando el rendimiento.

### 5.2.2. Ensayo Co-digestión de Fango Mixto y Suero Bruto

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y suero bruto. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la fase 1, tal y como se observa en la tabla 36. La mezcla de FM-Suero bruto presenta una eliminación de materia orgánica del 56%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 26%. Sin embargo, los sólidos volátiles presentan un porcentaje de eliminación superior, llegando al 35%. La relación AGV/ alcalinidad, disminuye de un 0.14 a un 0.05. Cabe destacar, la reducción del porcentaje de materia volátil hasta un 64,12%. La conductividad aumenta hasta un  $13,08 \pm 0.02 \text{ mScm}^{-1}$ .

Tabla 36. Ensayo FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 1

#### Fango Mixto -Suero Bruto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$24.693,25 \pm 0,71$	$10.904,14 \pm 0,76$	56
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$18.965,12 \pm 0,80$	$13.965,65 \pm 0,84$	26
Materia Seca	%	1,90	1,40	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$13.755,13 \pm 0,84$	$8.955,12 \pm 0,88$	35
Materia Volátil	%	72,53	64,12	
pH		$7,60 \pm 0,01$	$7,81 \pm 0,0$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$6,95 \pm 0,02$	$13,08 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.571,43 \pm 1,04$	$7.389,00 \pm 1,01$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$517,24 \pm 1,02$	$334,31 \pm 0,98$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$620,29 \pm 1,02$	$419,37 \pm 0,98$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,14	0,05	



Tal y como se observa en la tabla 37, respecto a la **fase 2**. La mezcla de FM-Suero bruto presenta una eliminación de materia orgánica del 57%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 37%. Sin embargo, los sólidos volátiles presentan un porcentaje de eliminación inferior, del 33%. La relación AGV/ alcalinidad, disminuye de un 0.24 a un 0.04. Cabe destacar, que la conductividad aumenta hasta un  $13,08 \pm 0.02 \text{ mScm}^{-1}$ .

Tabla 37. Ensayo FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 2

**Fango Mixto -Suero Bruto**

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$23.378,11 \pm 0,70$	$9.995,57 \pm 0,74$	57
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$19.070,03 \pm 0,82$	$11.965,09 \pm 0,88$	37
Materia Seca	%	1,91	1,20	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$9.860,21 \pm 0,85$	$6.654,36 \pm 0,80$	33
Materia Volátil	%	51,70	55,61	
pH		$7,01 \pm 0,01$	$7,81 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$7,28 \pm 0,02$	$13,08 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.120,45 \pm 1,09$	$6.600,87 \pm 1,05$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$995,20 \pm 0,95$	$280,54 \pm 0,99$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$1.194,80 \pm 0,95$	$340,60 \pm 0,99$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,24	0,04	

En la **fase 3**, como muestra en la tabla 38. El ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y suero bruto a mezcla de FM-Suero bruto presenta una eliminación de materia orgánica del 59%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 45%. Sin embargo, los sólidos volátiles presentan un porcentaje de eliminación superior, llegando al 34%. La relación AGV/ alcalinidad, disminuye de un 0.26 a un 0.05. Cabe destacar, el aumento del porcentaje de materia volátil hasta un 56,20%. La conductividad aumenta hasta un  $13,08 \pm 0.02 \text{ mScm}^{-1}$ .

Tabla 38. Ensayo FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 3

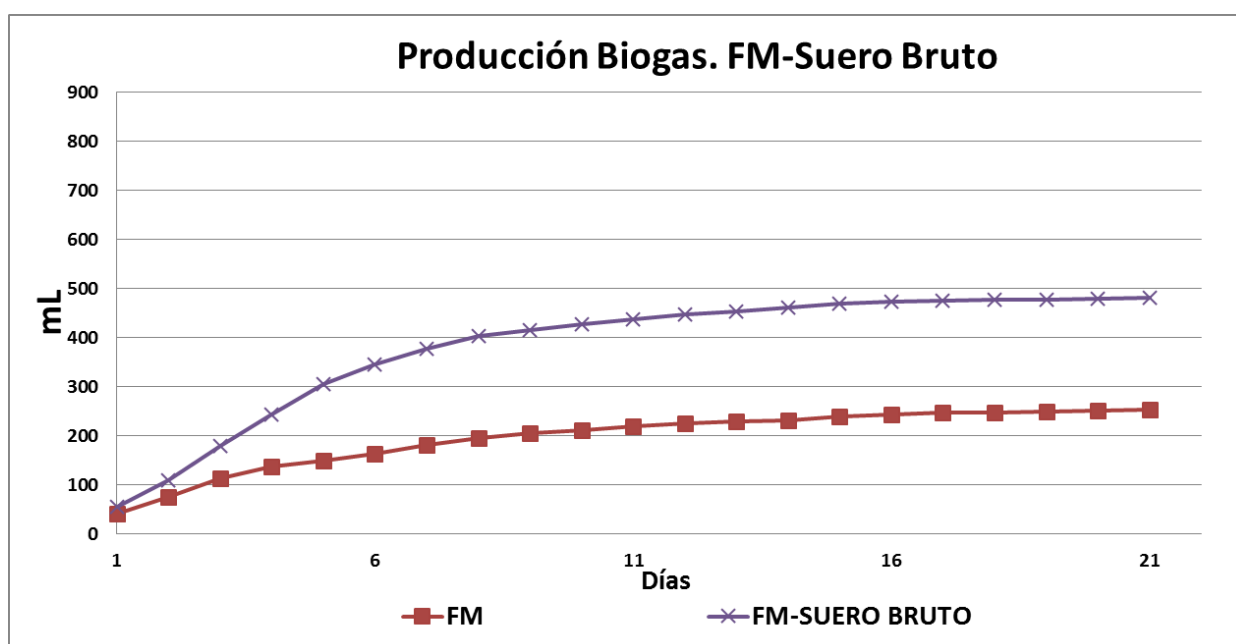
### Fango Mixto -Suero Bruto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$24.510,01 \pm 0,73$	$9.995,57 \pm 0,76$	59
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$21.450,03 \pm 0,88$	$11.840,51 \pm 0,90$	45
Materia Seca	%	2,15	1,18	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$10.120,12 \pm 0,82$	$6.654,09 \pm 0,84$	34
Materia Volátil	%	47,18	56,20	
pH		$7,01 \pm 0,01$	$7,81 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$7,28 \pm 0,02$	$13,08 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.183,67 \pm 1,03$	$8.000,80 \pm 1,06$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$1.103,45 \pm 1,04$	$390,07 \pm 0,97$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$1.324,14 \pm 1,04$	$471,15 \pm 0,97$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,26	0,05	

### 5.2.2.1. Producción de Biogás

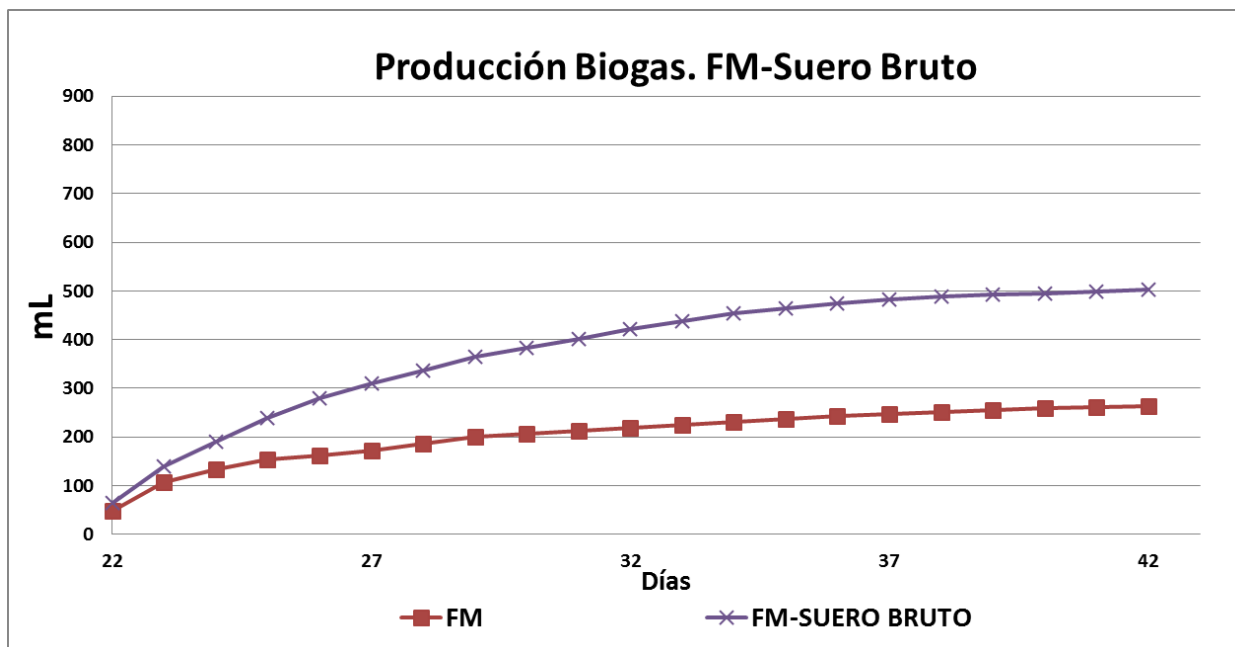
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de co-digestión anaerobia con fango mixto y suero bruto. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de fango mixto y suero bruto.

En la **fase 1** la producción de biogás presenta un crecimiento exponencial hasta el día 9, en el cual se estabiliza, siendo su producción total es de 481 mL. Con respecto al fango mixto (253 mL), la mezcla de FM-Suero bruto incrementa la producción de biogás en 228 mL, tal y como se representa en la gráfica 65.



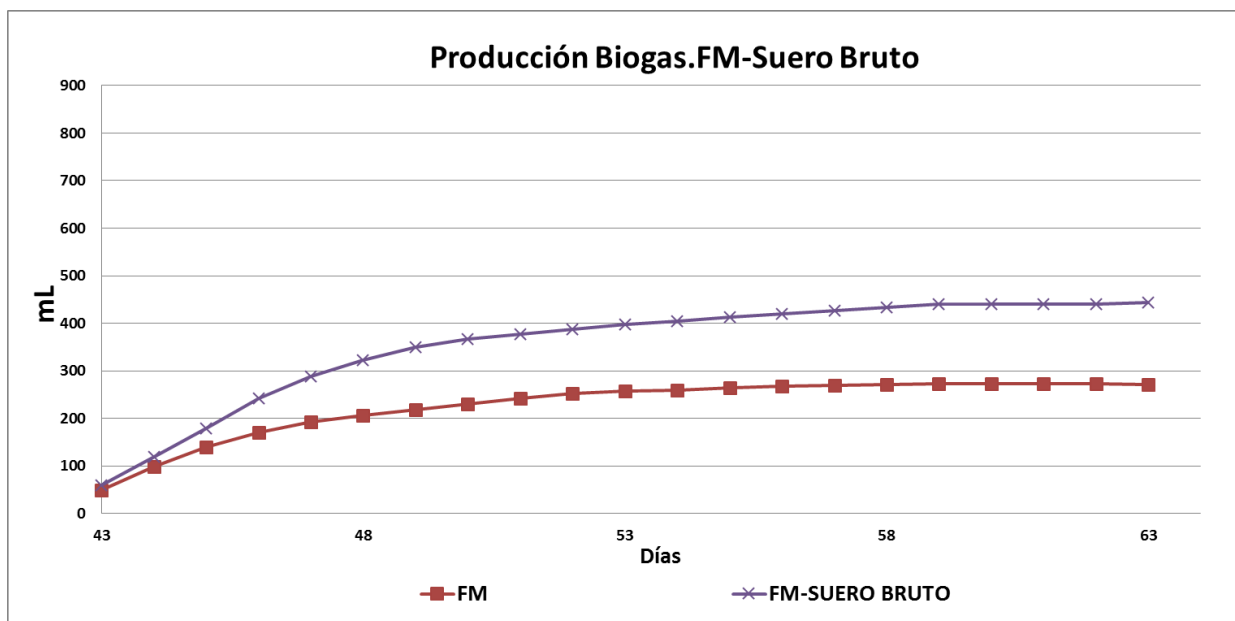
Gráfica 65. Producción Biogás FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 1

Tal y como se representa en la gráfica 66. En la **fase 2**, la producción de biogás presenta un crecimiento exponencial hasta el día 37, en el cual se estabiliza, siendo su producción total es de 502 mL. Con respecto al fango mixto (263 mL), el FM-Suero bruto incrementa la producción de biogás en 239 mL.



Gráfica 66. Producción Biogás FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 2

En la **fase 3**, la producción de biogás presenta un crecimiento exponencial hasta el día 52, en el cual se estabiliza, siendo su producción total es de 443 mL. Con respecto al fango mixto (272 mL), la mezcla de residuos (FM-Suero bruto) incrementa la producción de biogás en 177 mL, tal y como se representa en la gráfica 67.

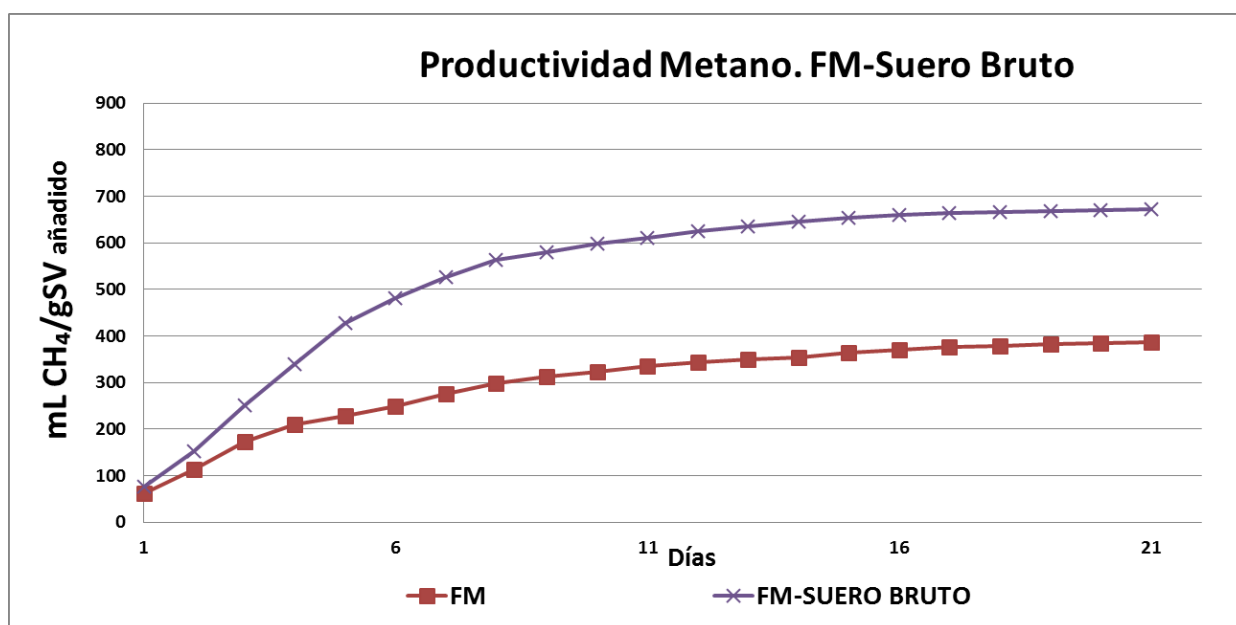


Gráfica 67. Producción Biogás FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 3

### 5.2.2.2. Productividad de Metano

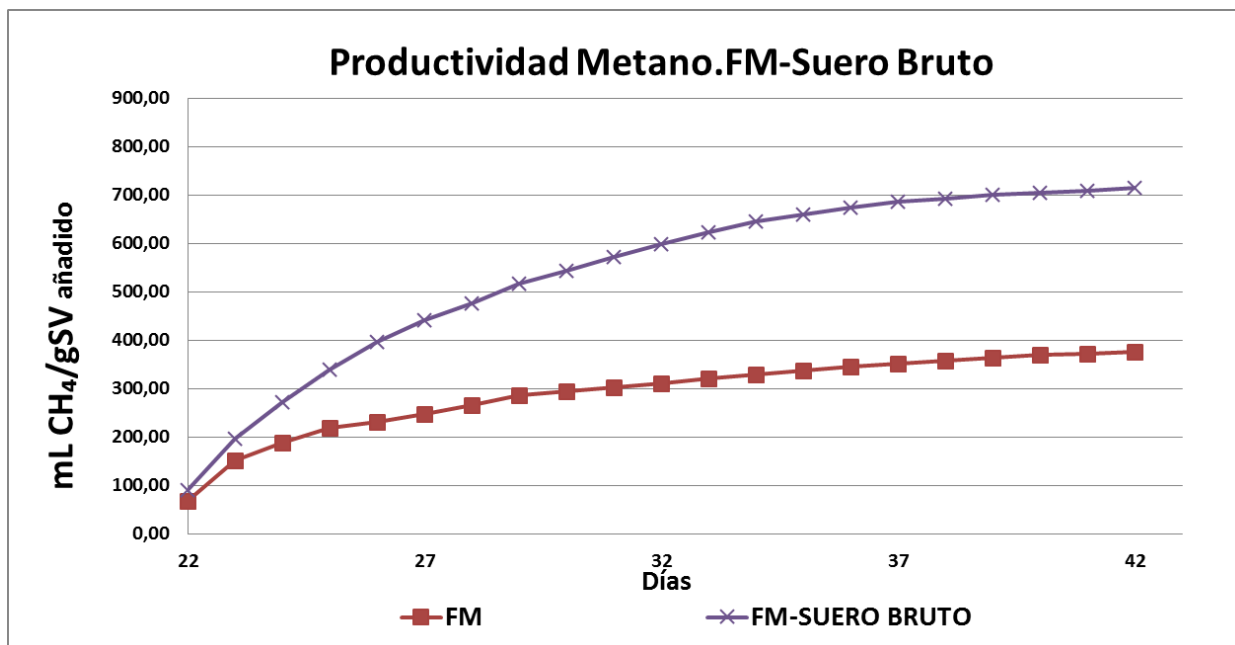
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y cascara de arroz, de las distintas fases temporales.

Como se observa en la gráfica 68 de la **fase 1**, la productividad de metano en la mezcla FM-Suero bruto es de 672 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, superior a la del fango mixto (386 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).



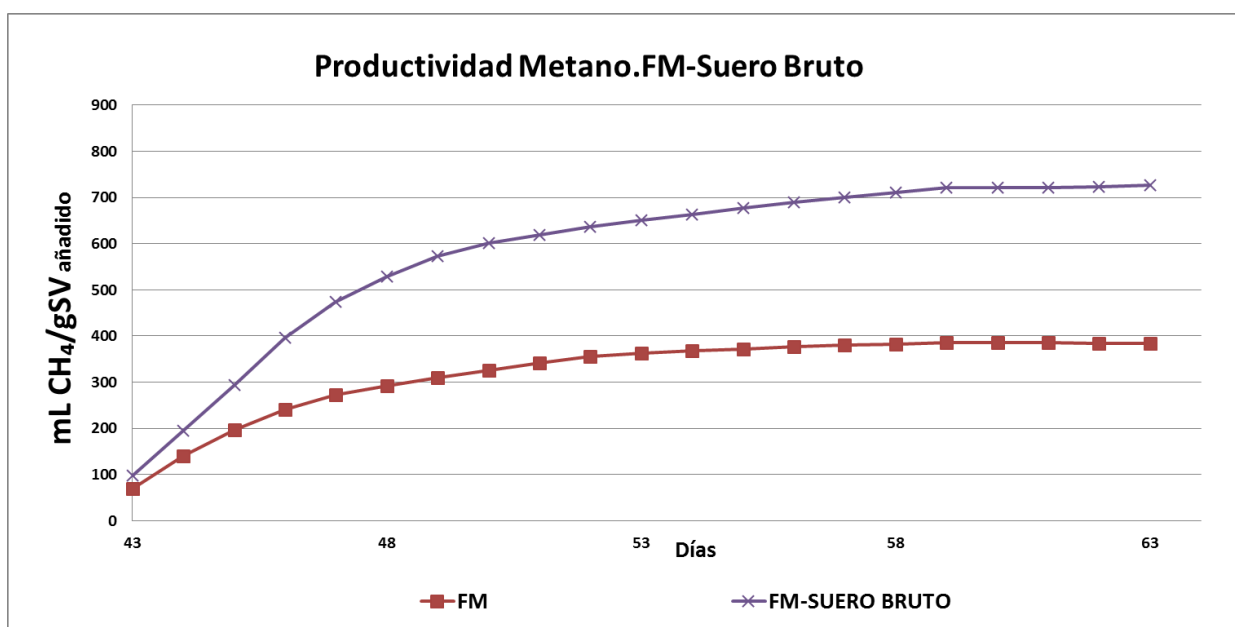
Gráfica 68. Productividad Metano FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 1

En la **fase 2**, la productividad de metano en la mezcla FM-Suero bruto es de 714 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, superior a la del fango mixto (375 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>), tal y como se observa en la gráfica 69.



Gráfica 69. Productividad Metano FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 2

Como se observa en la gráfica 70 con respecto a la **fase 3**, la productividad de metano en la mezcla FM-Suero bruto es de 727 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, superior a la del fango mixto (384 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).



Gráfica 70. Productividad Metano FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 3

#### **5.2.2.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. La mezcla de FM-Suero bruto presenta un porcentaje de metano en el biogás del 75%, superior al ensayo del fango mixto (70%).

A la vista de los resultados, la adición de la mezcla FM-Suero bruto en una co-digestión anaerobia ha conducido a un incremento significativo en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al fango mixto.

### 5.2.3. Ensayo Co-digestión de Fango Mixto y Suero Ácido

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y suero ácido. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1** del ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y suero ácido, se observa que la mezcla de FM-Suero ácido presenta una eliminación de materia orgánica del 57%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 27%. Sin embargo, los sólidos volátiles presentan un porcentaje de eliminación superior, llegando al 33%. La relación AGV/ alcalinidad disminuye de un 0.21 a un 0.04. Cabe destacar, la reducción del porcentaje de materia volátil hasta un 67,80%. La conductividad aumenta hasta un  $13,93 \pm 0,02 \text{ mScm}^{-1}$ . Tal y como se muestra en la tabla 39.

Tabla 39. Ensayo FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 1

#### Fango Mixto-Suero Ácido

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	24.895,41 ±0,70	10.591,10 ±0,72	57
ST	mg L <sup>-1</sup>	18.370,36 ±0,82	13.370,12 ±0,85	27
Materia Seca	%	1,84	1,34	
SV	mg L <sup>-1</sup>	13.560,65 ±0,85	9.065,41 ±0,86	33
Materia Volátil	%	73,82	67,80	
pH		7,36 ±0,01	7,80 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	7,15 ±0,02	13,93 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	3.877,55 ±1,00	8.070,00 ±1,04	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	803,45 ±0,98	341,21 ±1,00	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	964,19 ±0,98	421,45 ±1,00	
Relación AGV/Alcalinidad		0,21	0,04	



Como se observa en la en la tabla 40 que corresponde con la **fase 2**, la mezcla de FM-Suero ácido presenta una eliminación de DQO del 62%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 38% y, de sólidos volátiles (38%). La relación AGV/ alcalinidad, disminuye de un 0.23 a un 0.05. Cabe destacar, que la conductividad aumenta hasta un  $13,93 \pm 0.02 \text{ mScm}^{-1}$ .

Tabla 40. Ensayo FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 2

**Fango Mixto-Suero Ácido**

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$23.250,11 \pm 0,75$	$8.753,25 \pm 0,71$	62
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$19.395,39 \pm 0,82$	$12.103,27 \pm 0,84$	38
Materia Seca	%	1,94	1,21	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$9.970,30 \pm 0,88$	$6.213,41 \pm 0,86$	38
Materia Volátil	%	51,41	51,33	
pH		$7,05 \pm 0,01$	$7,80 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$7,50 \pm 0,02$	$13,93 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.200,85 \pm 1,05$	$6.810,09 \pm 1,08$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$980,12 \pm 1,03$	$340,85 \pm 0,98$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$1.176,41 \pm 1,03$	$420,36 \pm 0,98$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,23	0,05	

En la **fase 3** se observa que la mezcla de FM-Suero ácido presenta una eliminación de materia orgánica es del 60%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 44%. Sin embargo, los sólidos volátiles presentan un porcentaje de eliminación inferior, llegando al 39%. La relación AGV/ alcalinidad, disminuye de un 0.25 a un 0.07. La conductividad aumenta hasta un  $13,93 \pm 0.02 \text{ mScm}^{-1}$ . Tal y como se observa en la tabla 41.

Tabla 41. Ensayo FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 3

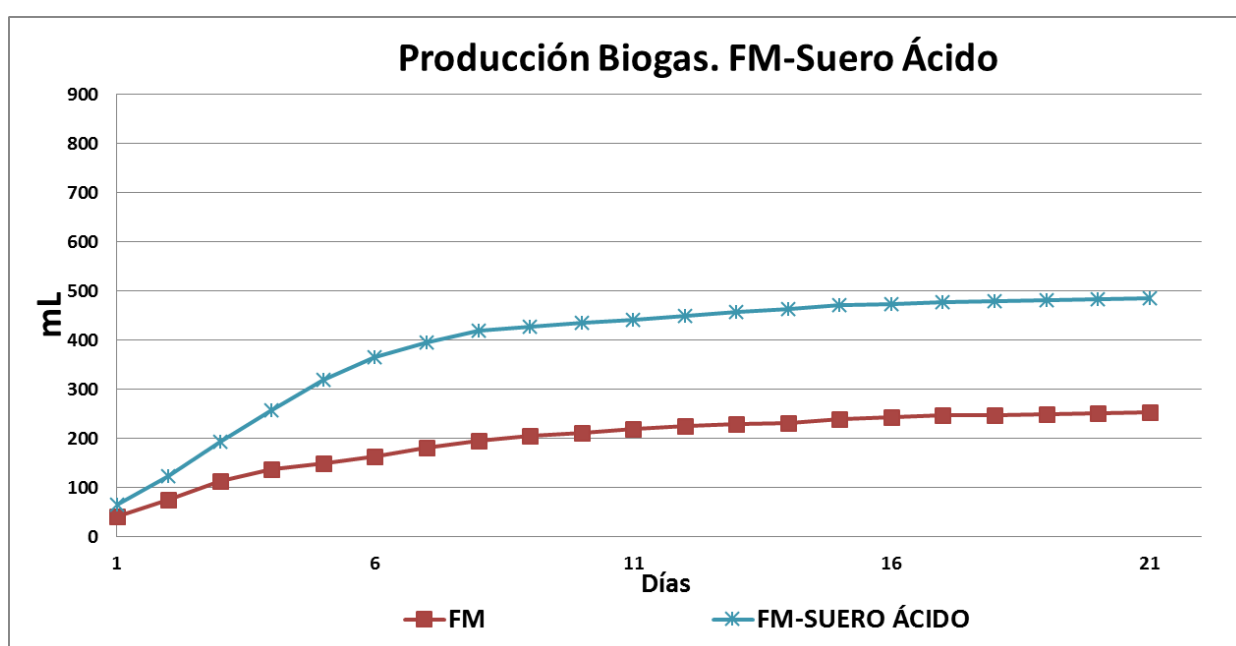
#### Fango Mixto-Suero Ácido

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$24.780,09 \pm 0,71$	$10.020,25 \pm 0,76$	60
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$21.475,33 \pm 0,88$	$12.030,35 \pm 0,84$	44
Materia Seca	%	2,15	1,20	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$10.310,41 \pm 0,90$	$6.310,52 \pm 0,85$	39
Materia Volátil	%	48,01	52,45	
pH		$7,05 \pm 0,01$	$7,80 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$7,50 \pm 0,02$	$13,93 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.183,70 \pm 1,06$	$8.800,00 \pm 1,03$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$1.051,72 \pm 0,94$	$600,61 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$1.262,07 \pm 0,94$	$741,74 \pm 1,00$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,25	0,07	

### 5.2.3.1. Producción de Biogás

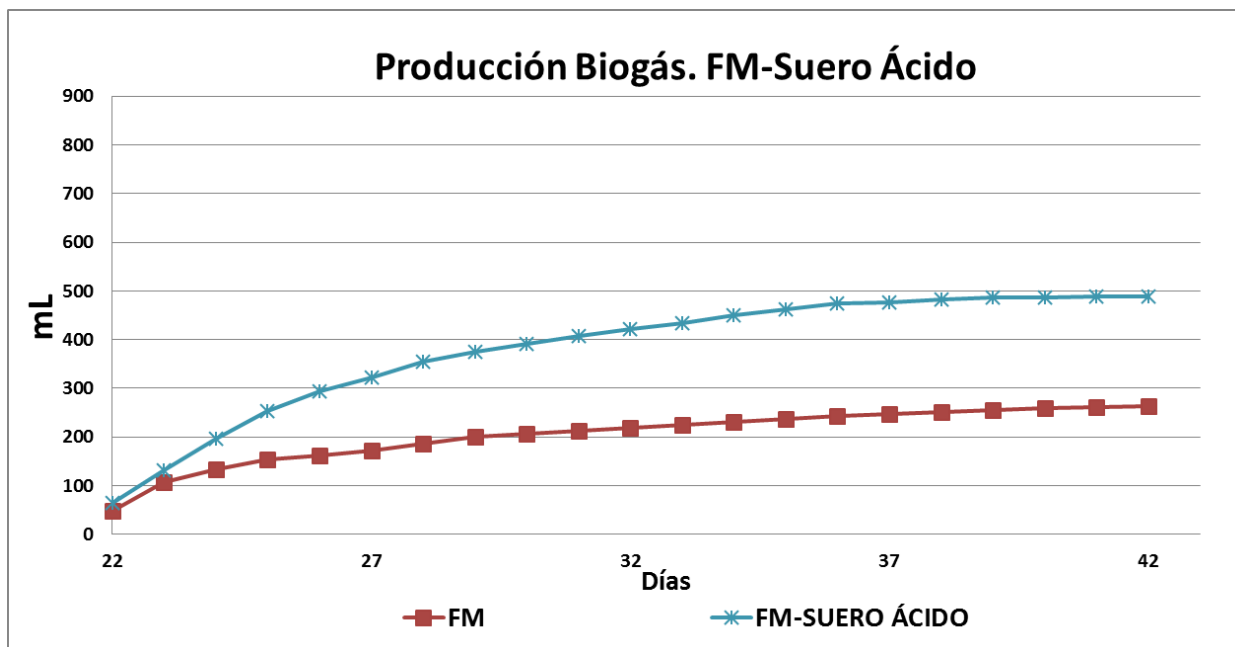
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de co-digestión anaerobia con fango mixto y suero ácido. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de fango mixto y suero ácido.

En la **fase 1**, tal y como se puede observar en la gráfica 71, la producción de biogás de la mezcla FM-Suero ácido presenta un crecimiento exponencial hasta el día 8, en el cual se estabiliza, generando una producción total de biogás de 484 mL.



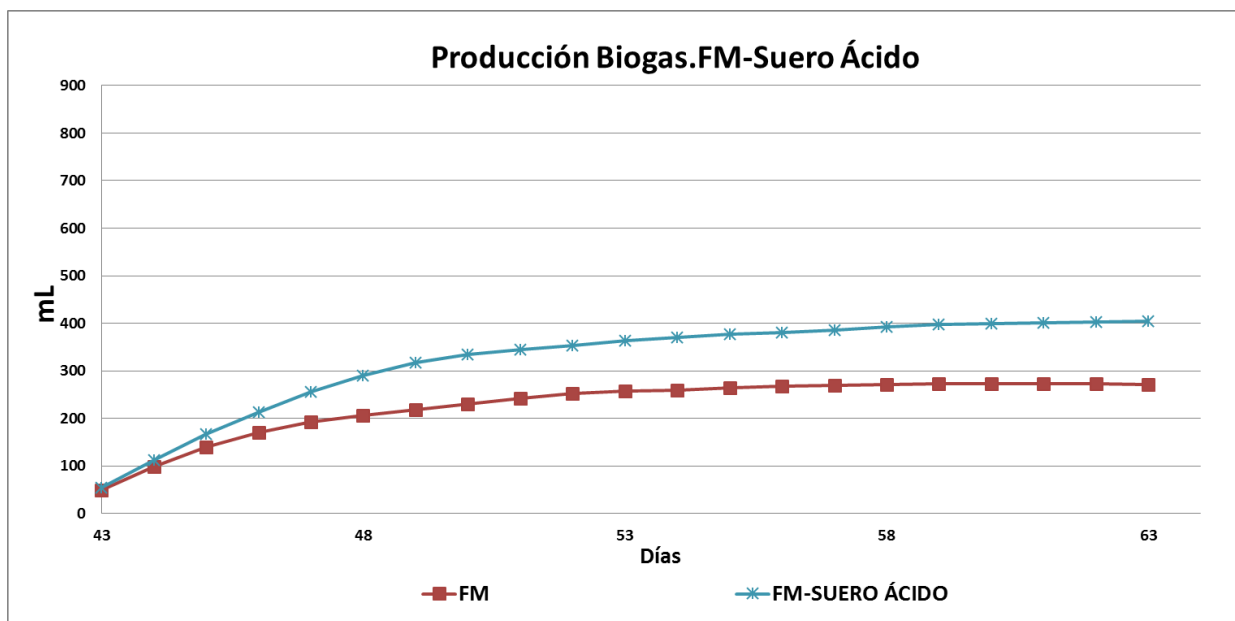
Gráfica 71. Producción Biogás FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 1

Como se puede observar en la gráfica 72, en la **fase 2**, la producción de biogás de la mezcla FM-Suero ácido presenta un crecimiento hasta el día 36, en el cual se estabiliza, generando una producción total de biogás de 489 mL.



Gráfica 72. Producción Biogás FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 2

En la **fase 3**, la producción de biogás del ensayo de co-digestión de fango mixto y suero ácido presenta un crecimiento exponencial hasta el día 49, en el cual se estabiliza, generando una producción total de biogás de 404 mL, tal y como se puede observar en la gráfica 73.

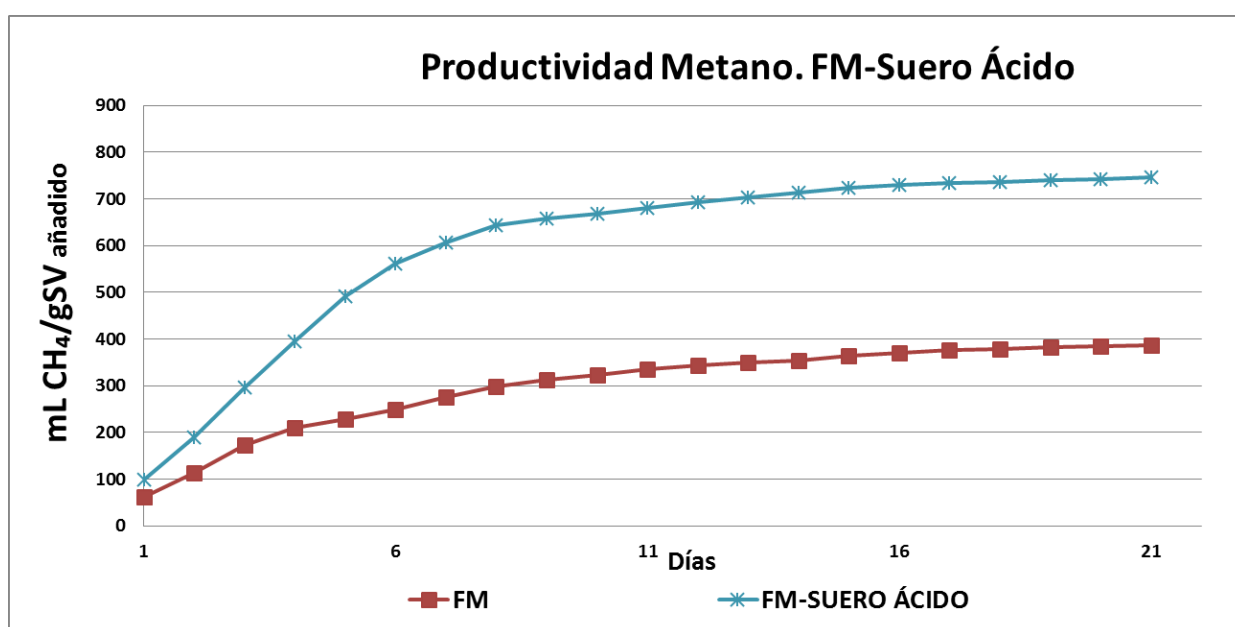


Gráfica 73. Producción Biogás FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 3

### 5.2.3.2. Productividad de Metano

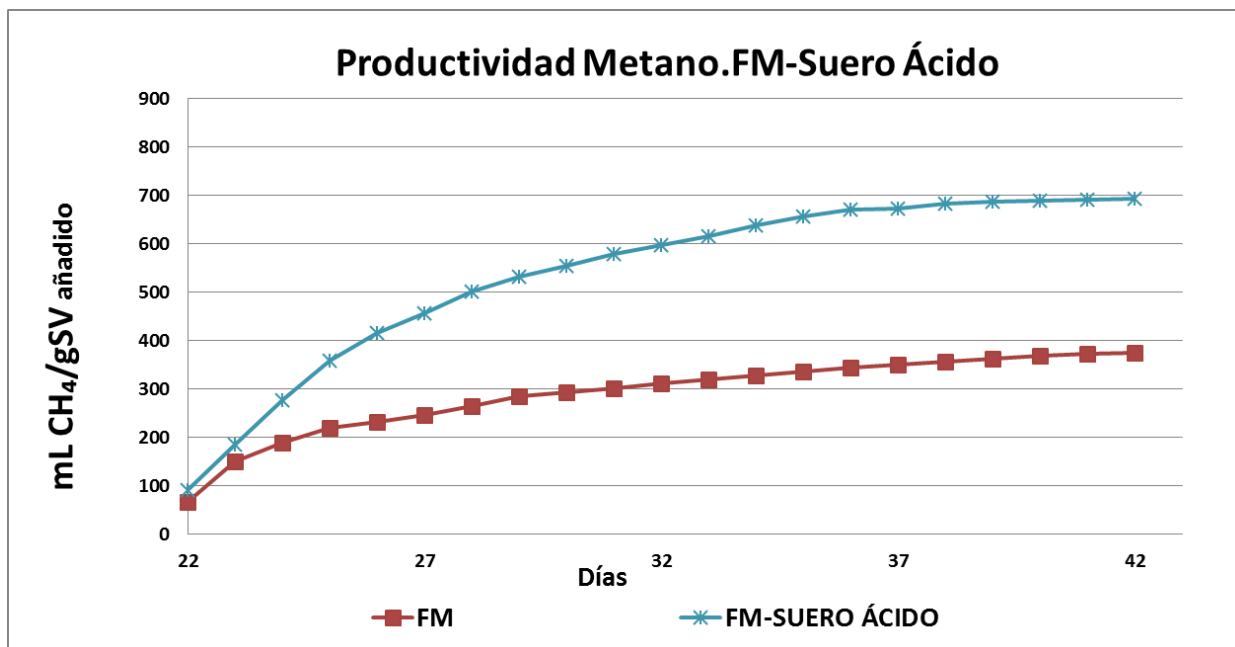
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y suero ácido, de las distintas fases temporales.

Con respecto a la productividad total de metano de la mezcla de residuos en la **fase 1**, es de 746 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> superior al fango mixto (386 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>). Tal y como se muestra en la gráfica 74.



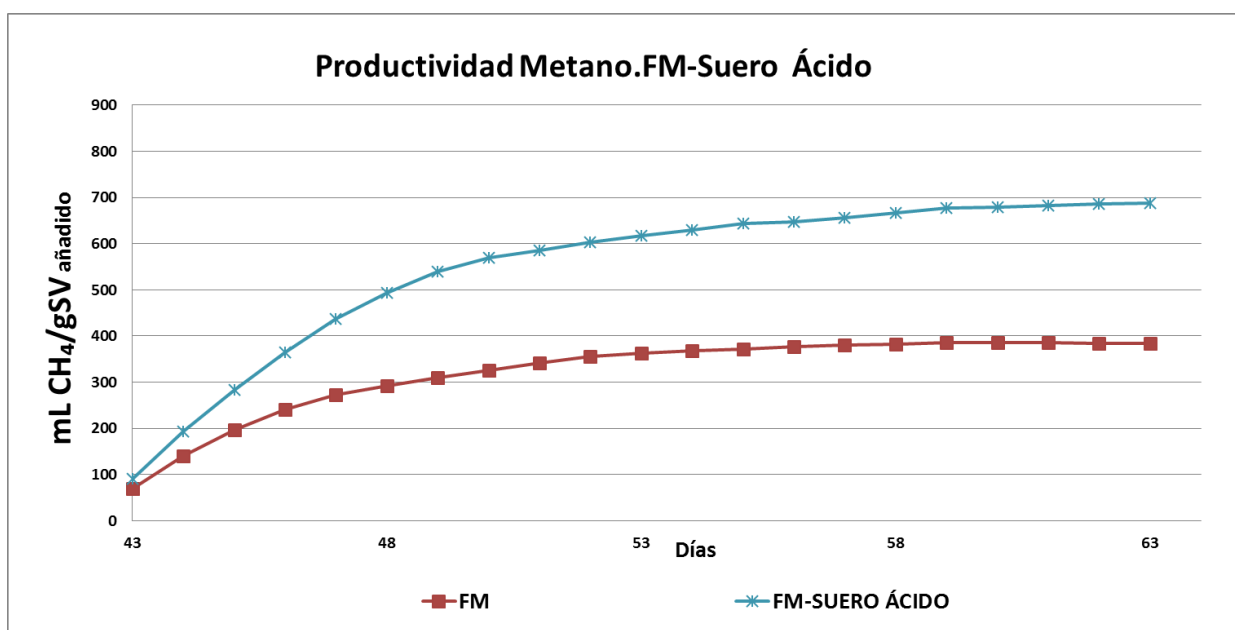
Gráfica 74. Productividad Metano FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 1

Como se observa en la gráfica 75, la productividad total de metano de la **fase 2** del ensayo de co-digestión de fango mixto y suero ácido, es de 693 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> superior al fango mixto (375 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).



Gráfica 75. Productividad Metano FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 2

En la **fase 3**, la productividad de metano de la mezcla de residuos, es de 688 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> superior al fango mixto (384 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>). Tal y como se observa en la gráfica 76.



Gráfica 76. Productividad Metano FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 3

#### **5.2.3.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. La mezcla de FM-Suero ácido presenta un porcentaje de metano en el biogás del 75%, un 5% superior al ensayo del fango mixto (70%).

A la vista de los resultados, la adición de la mezcla FM-Suero ácido en una co-digestión anaerobia ha conducido a un incremento significativo en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al fango mixto.

#### 5.2.4. Ensayo Co-digestión de Fango Mixto y Alperujo

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y suero bruto. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1**, como se observa en la tabla 42, la eliminación de materia orgánica en el FM-Alperujo, presenta una DQO de entrada de  $29.896,11 \pm 0,71 \text{ mgL}^{-1}$  y a la salida una DQO de  $11.422,19 \pm 0,75 \text{ mgL}^{-1}$ . Por lo tanto, presenta una eliminación de materia orgánica del 62%. Por otro lado la eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es del 31% y 34% respectivamente.

Tabla 42. Ensayo FM-Alperujo, Co-digestión Fase 1

#### Fango Mixto-Alperujo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$29.896,11 \pm 0,71$	$11.422,19 \pm 0,75$	62
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$21.255,25 \pm 0,81$	$14.560,33 \pm 0,85$	31
Materia Seca	%	2,13	1,46	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$16.765,21 \pm 88$	$11.040,10 \pm 0,90$	34
Materia Volátil	%	78,88	75,82	
pH		$7,86 \pm 0,01$	$7,69 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$7,22 \pm 0,02$	$12,98 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.081,63 \pm 1,02$	$6.872,52 \pm 1,05$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$563,79 \pm 1,02$	$373,62 \pm 1,04$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$676,55 \pm 1,02$	$448,34 \pm 1,04$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,14	0,05	



Como se observa en la tabla 43, que corresponde con la **fase 2**. La eliminación de materia orgánica en el ensayo de fango mixto y alperujo, presenta una DQO de entrada de  $25.412,30 \pm 0,77 \text{ mg L}^{-1}$  y a la salida una DQO de  $9.350,02 \pm 0,80 \text{ mg L}^{-1}$ . Por lo tanto, presenta una eliminación del 63%. Por otro lado la eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es del 42% y 34% respectivamente.

Tabla 43. Ensayo FM-Alperujo, Co-digestión Fase 2

#### Fango Mixto-Alperujo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$25.412,30 \pm 0,77$	$9.350,02 \pm 0,80$	63
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$24.140,09 \pm 0,88$	$13.980,11 \pm 0,83$	42
Materia Seca	%	2,41	1,40	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$15.075,19 \pm 0,85$	$9.978,84 \pm 0,90$	34
Materia Volátil	%	62,45	71,37	
pH		$7,10 \pm 0,01$	$7,69 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$7,59 \pm 0,02$	$12,98 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.350,41 \pm 1,09$	$7.100,63 \pm 1,04$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$1.200,31 \pm 1,01$	$350,29 \pm 0,96$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$1.440,80 \pm 1,01$	$420,14 \pm 0,96$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,28	0,05	

En la **fase 3**, como se observa en la tabla 44, la eliminación de materia orgánica en el ensayo de fango mixto y alperujo, presenta una DQO de entrada de  $26.102,02 \pm 0,75 \text{ mgL}^{-1}$  y a la salida una DQO de  $9.850,10 \pm 0,79 \text{ mgL}^{-1}$ . Por lo tanto, presenta una eliminación del 62%. Por otro lado la eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es del 43% y 35% respectivamente.

Tabla 44. Ensayo FM-Alperujo, Co-digestión Fase 3

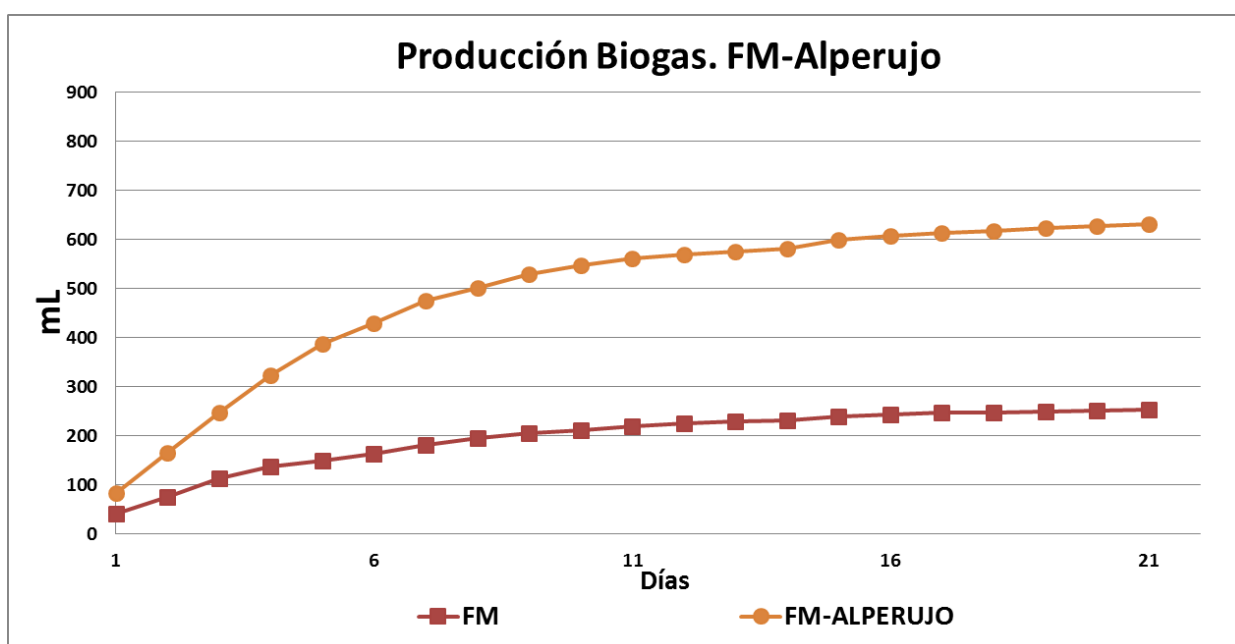
**Fango Mixto-Alperujo**

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$26.102,02 \pm 0,75$	$9.850,10 \pm 0,79$	62
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$24.650,11 \pm 0,81$	$14.020,15 \pm 0,88$	43
Materia Seca	%	2,47	1,40	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$15.420,30 \pm 0,82$	$9.975,40 \pm 0,85$	35
Materia Volátil	%	62,56	71,15	
pH		$7,10 \pm 0,01$	$7,69 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$7,59 \pm 0,02$	$12,98 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.591,84 \pm 1,06$	$8.800,69 \pm 1,01$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$1.689,66 \pm 1,02$	$390,74 \pm 0,96$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$2.027,59 \pm 1,02$	$468,84 \pm 0,96$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,37	0,04	

#### 5.2.4.1. Producción de Biogás

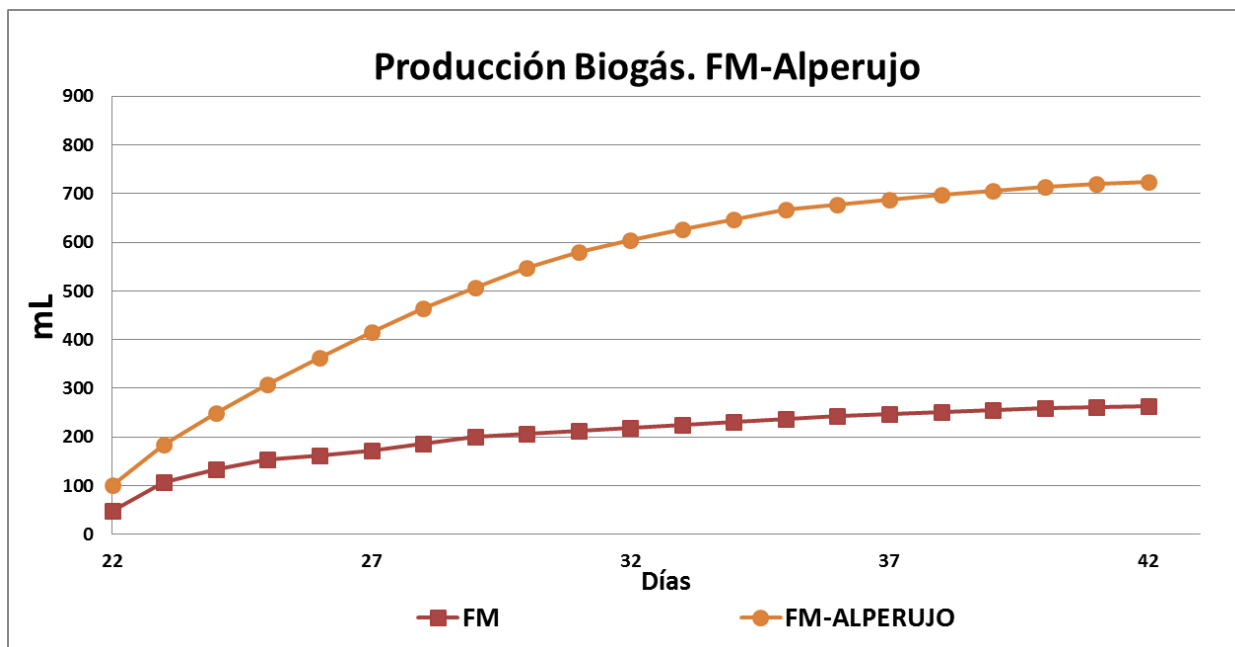
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de co-digestión anaerobia con fango mixto y alperujo. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de fango mixto y alperujo.

En la **fase 1**, como se puede observar en la gráfica 77, la mezcla de FM-Alperujo presenta un crecimiento rápido hasta el día 16, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, generando un volumen total de 632 mL, incrementando en 397 mL la producción del fango mixto (253mL).



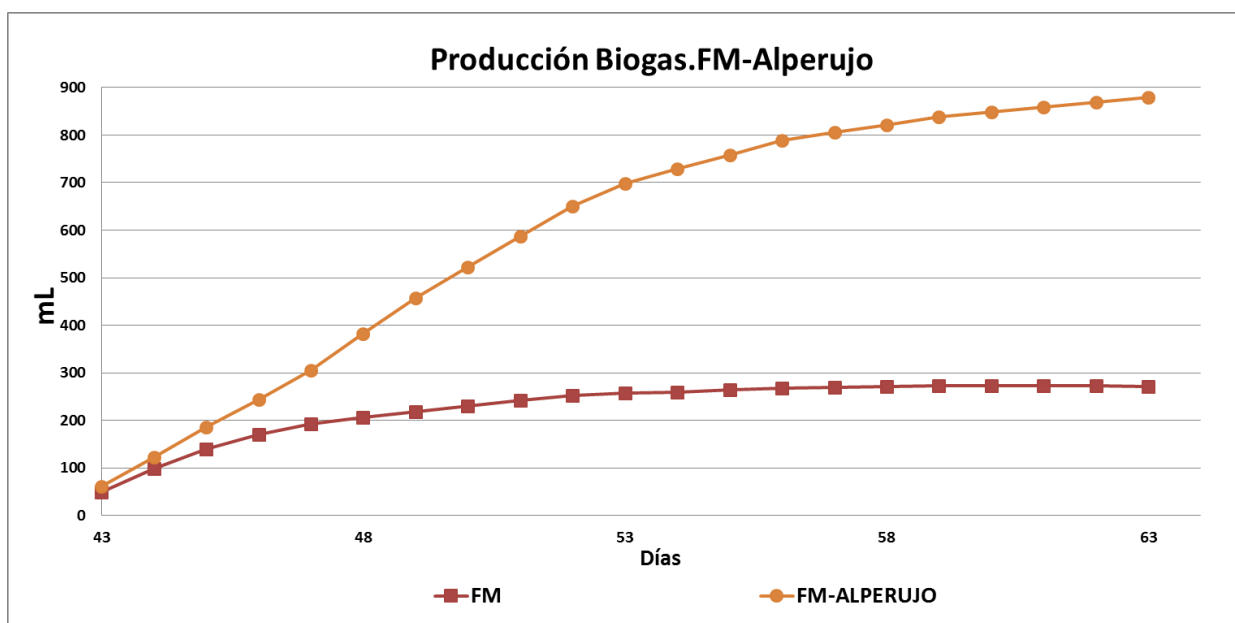
Gráfica 77. Producción Biogás FM-Alperujo, Co-digestión Fase 1

Como se puede observar en la gráfica 78 que corresponde con la **fase 2**, la mezcla de FM-Alperujo presenta un crecimiento rápido hasta el día 36, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, generando un volumen total de 725 mL, incrementando en 462 mL la producción del fango mixto (263 mL).



Gráfica 78. Producción Biogás FM-Alperujo, Co-digestión Fase 2

En la **fase 3**, la mezcla de FM-Alperujo presenta un crecimiento rápido hasta el día 53, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, generando un volumen total de 880 mL, incrementando en 608 mL, la producción del fango mixto (272 mL), tal y como se puede observar en la gráfica 79.

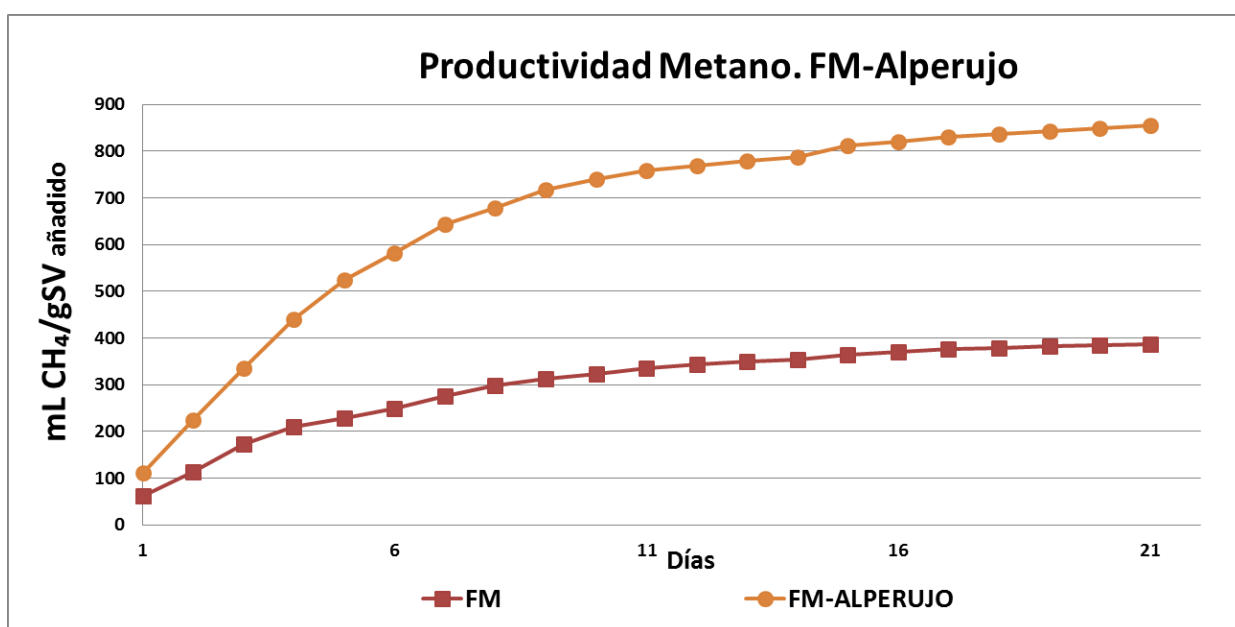


Gráfica 79. Producción Biogás FM-Alperujo, Co-digestión Fase 3

#### 5.2.4.2. Productividad de Metano

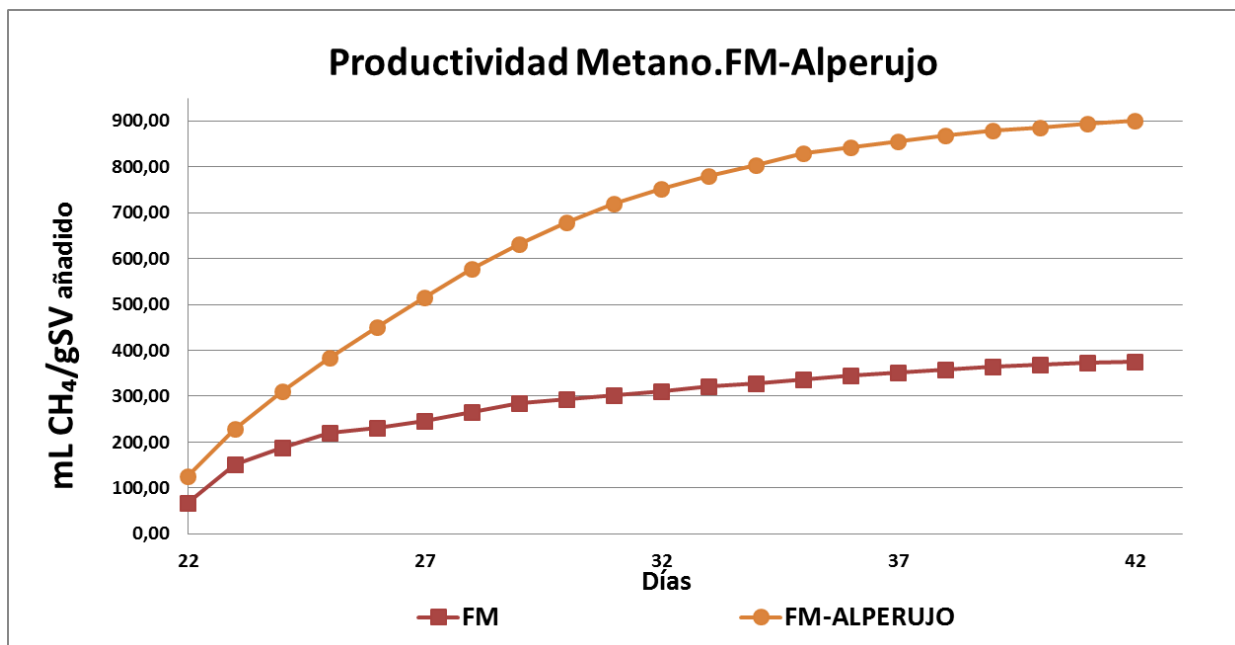
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y alperujo, de las distintas fases temporales.

En la **fase 1**, tal y como se muestra en la gráfica 80. La productividad de metano de la mezcla de FM-Alperujo es de 856 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> y, la productividad del fango mixto es de 386 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



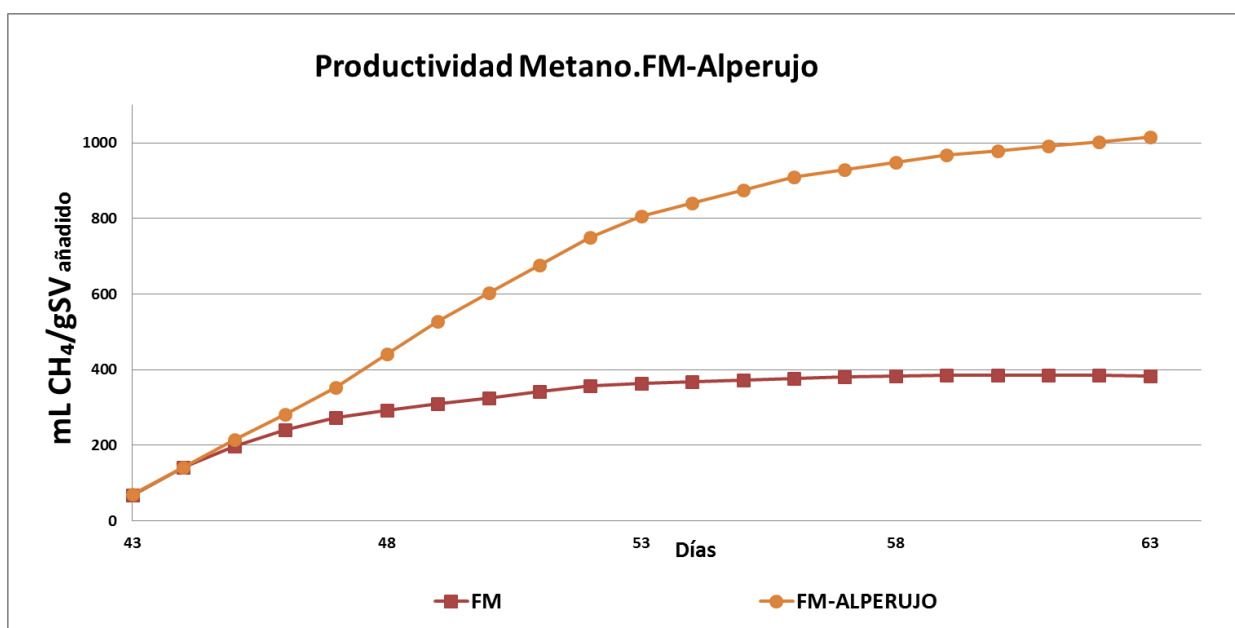
Gráfica 80. Productividad Metano FM-Alperujo, Co-digestión Fase 1

Tal y como se muestra en la gráfica 81, respecto a la **fase 2**. La productividad de metano de la mezcla de FM-Alperujo es de 901 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> siendo superior a la productividad del fango mixto (375 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).



Gráfica 81. Productividad Metano FM-Alperujo, Co-digestión Fase 2

En la **fase 3** se muestra en la gráfica 82, la productividad de metano de la mezcla de FM-Alperujo es de 1.016 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> y, la productividad del fango mixto es de 384mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 82. Productividad Metano FM-Alperujo, Co-digestión Fase 3

#### **5.2.4.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. El porcentaje de metano en el ensayo con la mezcla FM-Alperujo es del 75%, superior al ensayo del fango mixto (70%).

A la vista de los resultados, la adición de la mezcla FM-Alperujo en una co-digestión anaerobia ha conducido a un incremento muy significativo en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al fango mixto.

### 5.2.5. Ensayo Co-digestión de Fango Mixto y Aguas de Glicerina

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y glicerina. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

La tabla 45 que corresponde con la **fase 1** del ensayo de co-digestión de fango mixto y glicerina, la mezcla del fango mixto con el residuo de la fabricación de biodiesel presenta una eliminación de materia orgánica del 52%. En los SV presenta una eliminación del 21%. En cambio, en los ST el porcentaje de eliminación disminuye hasta el 23%.

Tabla 45. Ensayo FM-Glicerina, Co-digestión Fase 1

#### Fango Mixto-Glicerina

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	25.368,10 ±0,78	15.220,05 ±0,77	52
ST	mg L <sup>-1</sup>	19.719,08 ±0,81	15.220,01 ±0,85	23
Materia Seca	%	1,97	1,52	
SV	mg L <sup>-1</sup>	13.770,12 ±0,84	10.840,32 ±0,88	21
Materia Volátil	%	69,83	71,22	
pH		7,54 ±0,01	7,72 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	8,73 ±0,02	13,31 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	3.836,73 ±1,05	2.964,18 ±1,03	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	336,21 ±1,01	236,03 ±0,98	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	403,45 ±1,01	283,24 ±0,98	
Relación AGV/Alcalinidad		0,09	0,08	



En la **fase 2**, como se observa en la tabla 46, la mezcla del fango mixto y glicerina presenta una eliminación de materia orgánica del 44%. En los SV presenta una eliminación del 23%. En cambio, en los ST el porcentaje de eliminación aumenta hasta el 32%. La conductividad aumenta hasta un  $13,31 \pm 0,02 \text{ mScm}^{-1}$ .

Tabla 46. Ensayo FM-Glicerina, Co-digestión Fase 2

**Fango Mixto-Glicerina**

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$23.983,11 \pm 0,70$	$13.430,02 \pm 0,74$	44
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$22.255,36 \pm 0,81$	$15.220,96 \pm 0,88$	32
Materia Seca	%	2,23	1,52	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$11.525,41 \pm 0,85$	$8.870,35 \pm 0,90$	23
Materia Volátil	%	51,79	58,28	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,72 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$8,81 \pm 0,02$	$13,31 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.500,20 \pm 1,08$	$6.000,15 \pm 1,06$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$700,48 \pm 1,03$	$660,22 \pm 0,92$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$840,74 \pm 1,03$	$792,53 \pm 0,92$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,20	0,11	

En la **fase 3**, la mezcla del fango mixto con el residuo de la fabricación de biodiesel presenta una eliminación de materia orgánica del 45%. En los SV presenta una eliminación del 26%. En cambio, en los ST el porcentaje de eliminación disminuye hasta el 21%. Tal y como se observa en la tabla 47.

Tabla 47. Ensayo FM-Glicerina, Co-digestión Fase 3

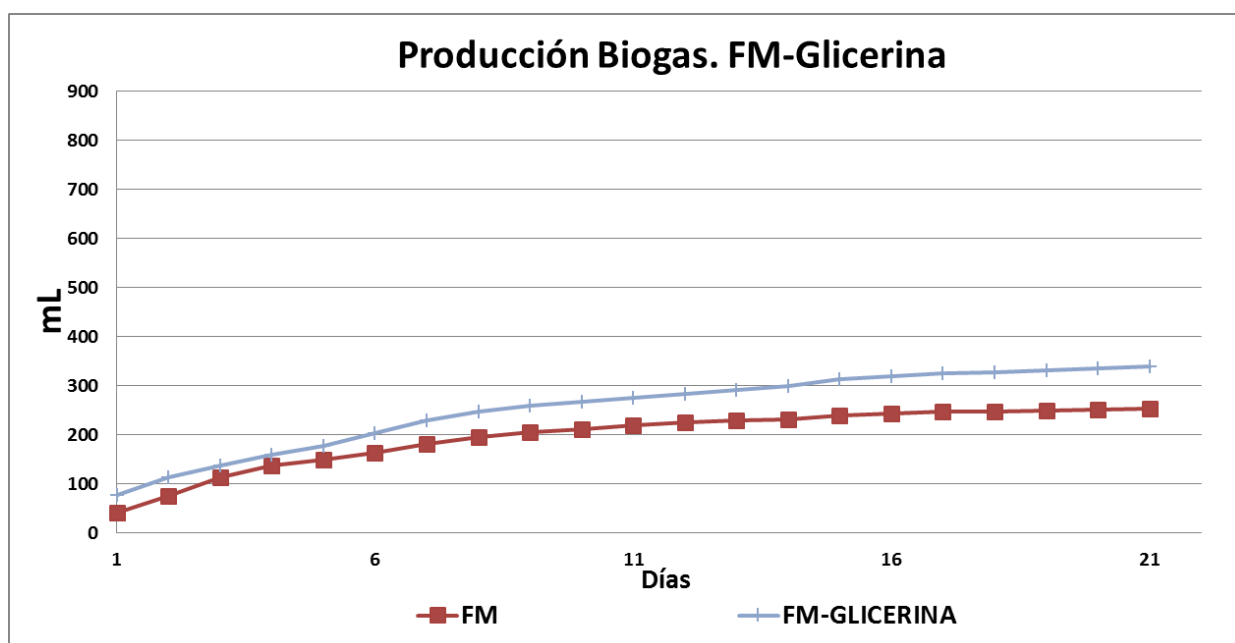
**Fango Mixto-Glicerina**

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	24.560,12 ±0,73	13.510,41 ±0,78	45
ST	mg L <sup>-1</sup>	20.140,60 ±0,80	14.980,32 ±0,84	26
Materia Seca	%	2,01	1,50	
SV	mg L <sup>-1</sup>	12.002,10 ±0,86	9.510,06 ±0,90	21
Materia Volátil	%	59,59	63,48	
pH		7,00 ±0,01	7,72 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	8,81 ±0,02	13,31 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	3.469,39 ±1,00	5.800,78 ±1,04	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	810,34 ±0,95	650,25 ±1,00	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	972,41 ±0,95	780,41 ±1,00	
Relación AGV/Alcalinidad		0,23	0,11	

### 5.2.5.1. Producción de Biogás

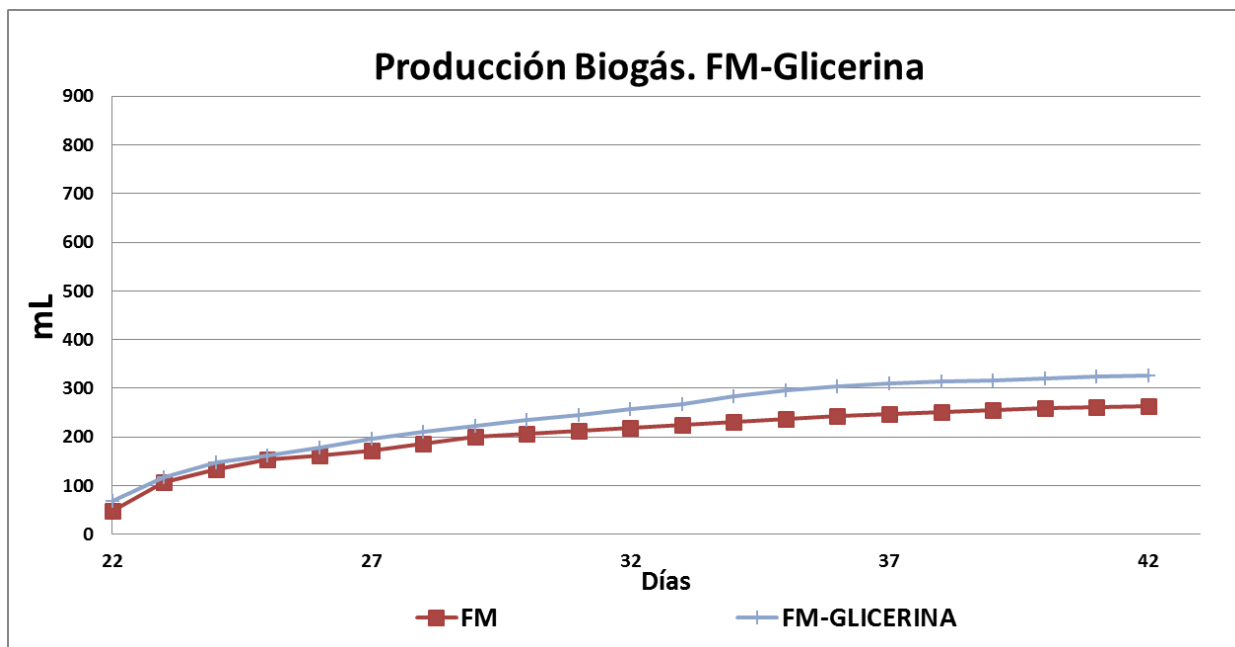
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de co-digestión anaerobia con fango mixto y glicerina. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de fango mixto y glicerina.

La producción de biogás del ensayo de fango mixto y glicerina en la **fase 1**, presenta un crecimiento similar al fango mixto hasta el día 6. La producción de biogás de la mezcla FM-Glicerina, se estabiliza a partir del día 6, generando una producción total de biogás de 339 mL Con respecto al fango mixto (253 mL ), la mezcla FM-Glicerina (339 mL) incrementa la producción de biogás en 86 mL, tal y como se representa en la gráfica 83.



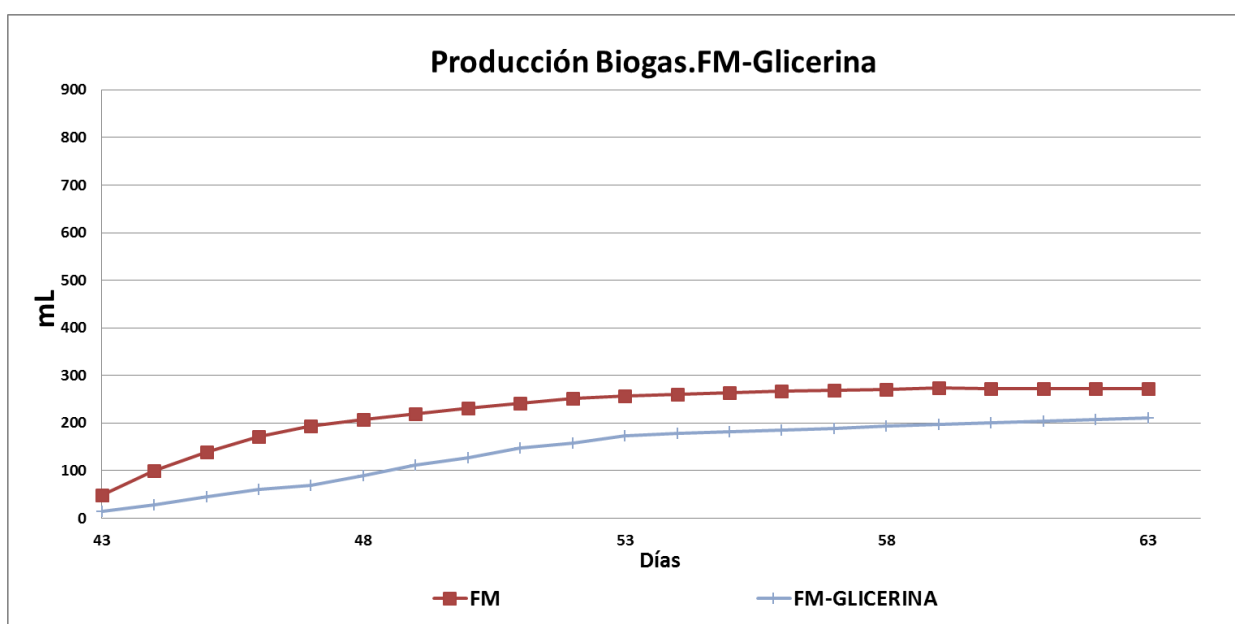
Gráfica 83. Producción Biogás FM-Glicerina, Co-digestión Fase 1

En la **fase 2**, la producción de biogás de la mezcla FM-Glicerina, presenta un crecimiento similar al fango mixto hasta el día 30. La producción de biogás de la mezcla FM-Glicerina, se estabiliza a partir del día 36, generando una producción total de biogás de 327 mL Con respecto al fango mixto (2.631 mL ), la mezcla FM-Glicerina (327 mL) incrementa la producción de biogás en 64 mL, tal y como se representa en la gráfica 84.



Gráfica 84. Producción Biogás FM-Glicerina, Co-digestión Fase 2

Como se representa en la gráfica 85 de la **fase 3**. La producción de biogás de la mezcla FM-Glicerina, presenta un crecimiento por debajo del fango mixto, presentando una diferencia más notoria del día 44 al 53, generando una producción total de biogás de 211 mL. Con respecto al fango mixto (272 mL), la mezcla FM-Glicerina (211 mL) disminuye la producción de biogás en 61 mL.

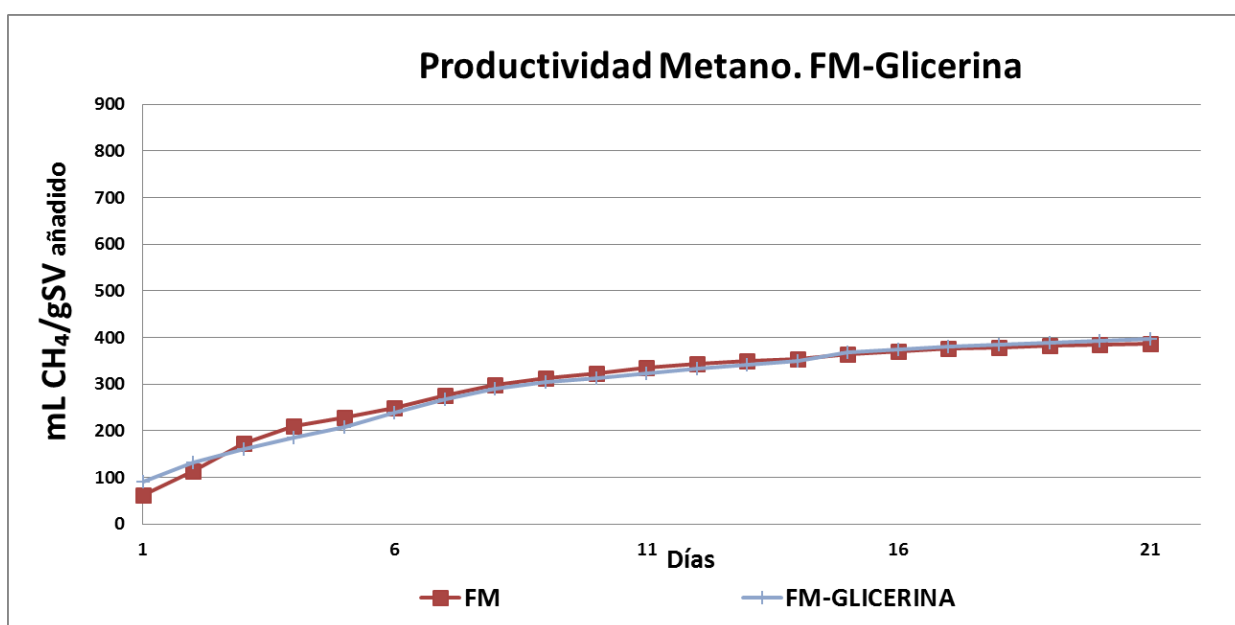


Gráfica 85. Producción Biogás FM-Glicerina, Co-digestión Fase 3

### 5.2.5.2. Productividad de Metano

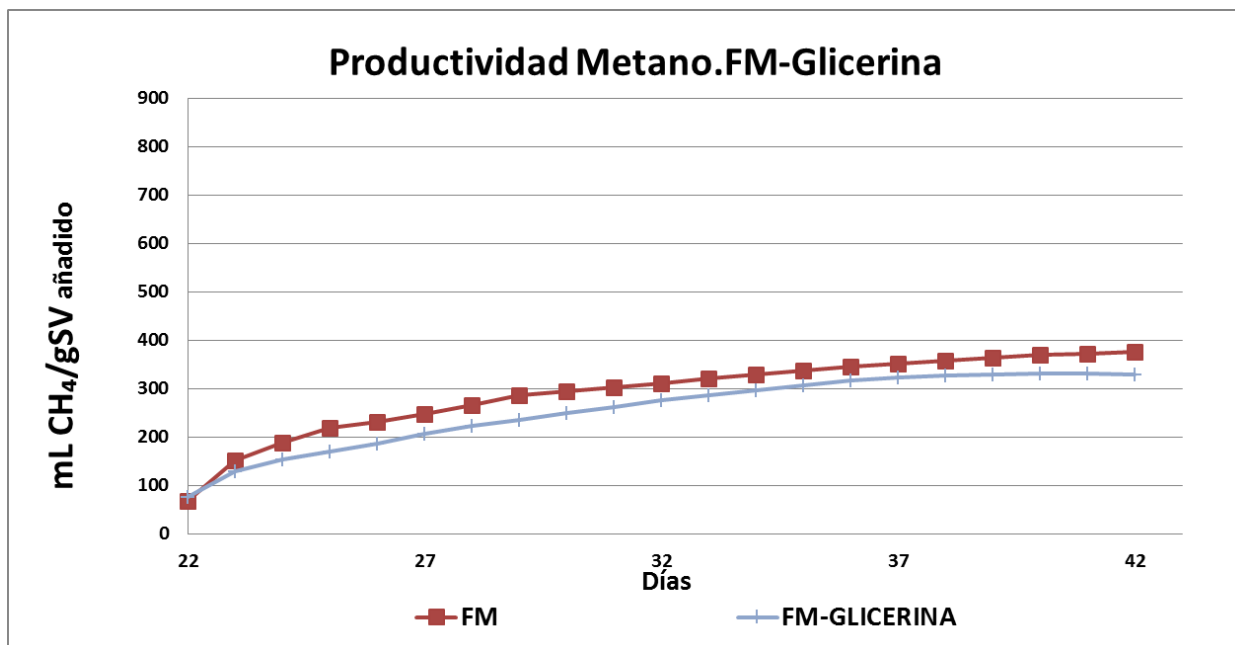
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y glicerina, de las distintas fases temporales.

Como se observa en la gráfica 86 en la **fase 1**, la productividad de metano en la mezcla de FM-Glicerina es de 398 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, es superior a la del fango mixto 386 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



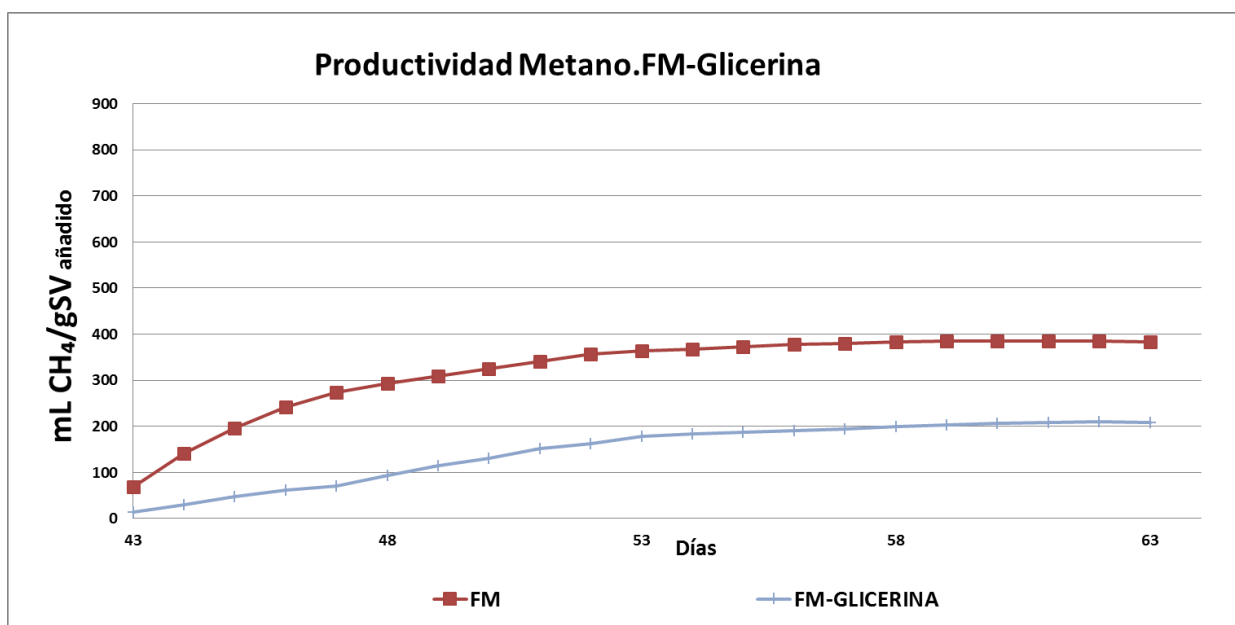
Gráfica 86. Productividad Metano FM-Glicerina, Co-digestión Fase 1

En la **fase 2** como se observa en la gráfica 87, la productividad de metano en la mezcla de FM-Glicerina es de 330 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, es inferior a la del fango mixto 375 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 87. Productividad Metano FM-Glicerina, Co-digestión Fase 2

Como se observa en la gráfica 88, que corresponde con la **fase 3**. La productividad de metano en la mezcla de FM-Glicerina es de 209 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, es inferior a la del fango mixto 384 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 88. Productividad Metano FM-Glicerina, Co-digestión Fase 3

#### **5.2.5.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases. En la primera fase, el porcentaje de metano en el ensayo con la mezcla FM-Glicerina es del 65%, un 10% menor, con respecto al ensayo del fango mixto (75%). En la fase 2 y 3, el porcentaje de metano en el ensayo con la mezcla FM-Glicerina es del 65%, un 5% menor con respecto al ensayo del fango mixto (70%).

A la vista de los resultados, la adición de la mezcla FM-Glicerina en una co-digestión anaerobia ha conducido a una disminución en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al fango mixto.

### 5.2.6. Ensayo Co-digestión de Fango Mixto y Lixiviado

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y suero bruto. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la tabla 48 que corresponde con la **fase 1**, se observa que la mezcla del fango mixto con el lixiviado presenta una eliminación de materia orgánica del 51%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 29%. En cambio el porcentaje de eliminación de sólidos volátiles disminuye hasta un 25%. El pH, disminuye hasta un  $7,93 \pm 0,01$ . Cabe destacar, el incremento de la alcalinidad a la salida del ensayo, llegando hasta un  $6.706,82 \pm 1,06 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ .

Tabla 48. Ensayo FM-Lixiviado, Co-digestión Fase 1

#### Fango Mixto-Lixiviado

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$18.562,41 \pm 0,75$	$9.090,12 \pm 0,79$	51
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$14.850,30 \pm 0,80$	$10.560,41 \pm 0,84$	29
Materia Seca	%	1,49	1,06	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$11.200,63 \pm 0,82$	$8.385,09 \pm 0,87$	25
Materia Volátil	%	75,42	79,40	
pH		$8,34 \pm 0,01$	$7,93 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$7,30 \pm 0,02$	$13,42 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.571,83 \pm 1,08$	$6.706,82 \pm 1,06$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$267,24 \pm 1,04$	$264,03 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$320,69 \pm 1,04$	$317,79 \pm 1,00$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,07	0,04	



Como se observa en la tabla 49, respecto a la **fase 2**, se observa que la mezcla del fango mixto con el lixiviado presenta una eliminación de materia orgánica del 48%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 35%. En cambio el porcentaje de eliminación de sólidos volátiles disminuye hasta un 25%. El pH, disminuye hasta un  $7,93 \pm 0,01$ . Cabe destacar, el incremento de la alcalinidad a la salida del ensayo, llegando hasta un  $6.200,85 \pm 1,06 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ , un aumento de la conductividad hasta  $13,42 \pm 0,02 \text{ mScm}^{-1}$

Tabla 49. Ensayo FM-lixiviado, Co-digestión Fase 2

#### Fango Mixto-Lixiviado

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$19.814,12 \pm 0,72$	$10336,14 \pm 0,75$	48
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$17.705,84 \pm 0,88$	$11560,52 \pm 0,81$	35
Materia Seca	%	1,77	1,16	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$8.935,14 \pm 0,82$	$6685,16 \pm 0,86$	25
Materia Volátil	%	50,47	57,83	
pH		$7,53 \pm 0,01$	$7,93 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$8,18 \pm 0,02$	$13,42 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.185,77 \pm 1,02$	$6.200,85 \pm 1,06$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$480,88 \pm 1,03$	$250,22 \pm 0,99$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$250,12 \pm 1,03$	$240,11 \pm 0,99$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,11	0,04	

Los resultados analíticos de la **fase 3**, se muestran en la tabla 50, se observa que ensayo del fango mixto y el lixiviado presenta una eliminación de materia orgánica del 48%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 33%. En cambio el porcentaje de eliminación de sólidos volátiles disminuye hasta un 26%. El pH, aumenta hasta un 7,93  $\pm 0,01$ . Cabe destacar, el incremento de la alcalinidad a la salida del ensayo, llegando hasta un 8.600,41  $\pm 1,03$  mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>,

Tabla 50. Ensayo FM-Lixiviado, Co-digestión Fase 3

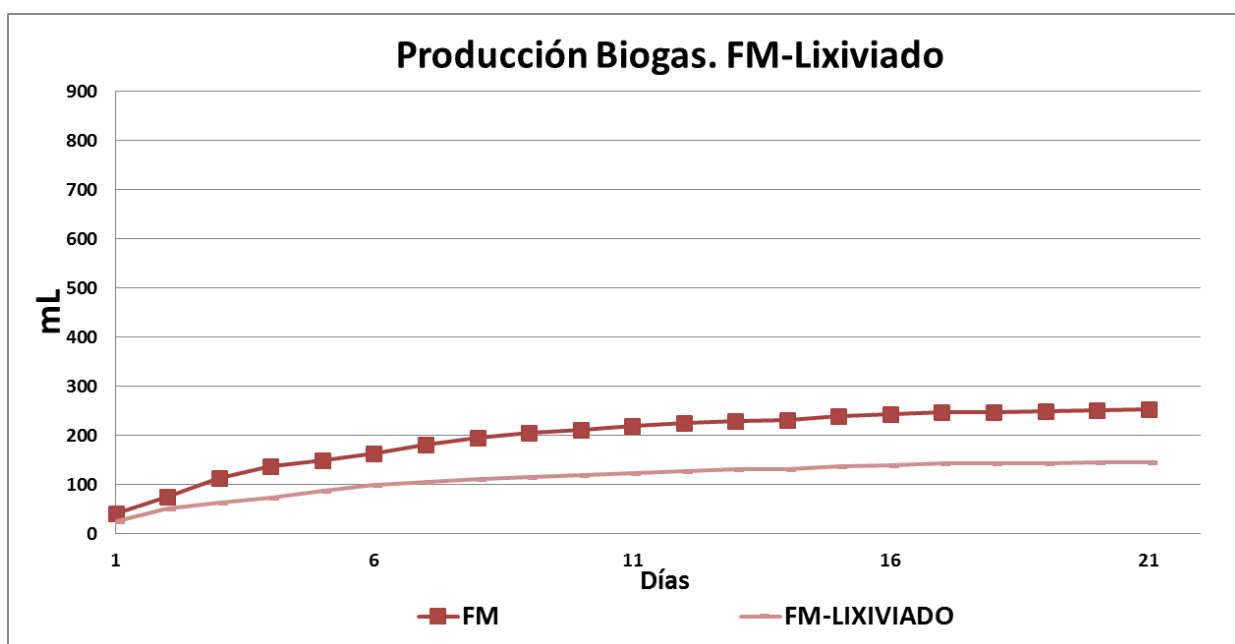
Fango Mixto-Lixiviado

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	20.410,11 $\pm 0,70$	10.520,54 $\pm 0,74$	48
ST	mg L <sup>-1</sup>	17.050,21 $\pm 0,82$	11.450,63 $\pm 0,86$	33
Materia Seca	%	1,71	1,15	
SV	mg L <sup>-1</sup>	9.120,55 $\pm 0,85$	6.750,96 $\pm 0,90$	26
Materia Volátil	%	53,49	58,95	
pH		7,53 $\pm 0,01$	7,93 $\pm 0,01$	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	8,18 $\pm 0,02$	13,42 $\pm 0,02$	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	4.183,67 $\pm 1,06$	8.600,41 $\pm 1,03$	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	508,62 $\pm 1,00$	293,10 $\pm 0,95$	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	610,34 $\pm 1,00$	351,72 $\pm 0,95$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,12	0,03	

### 5.2.6.1. Producción de Biogás

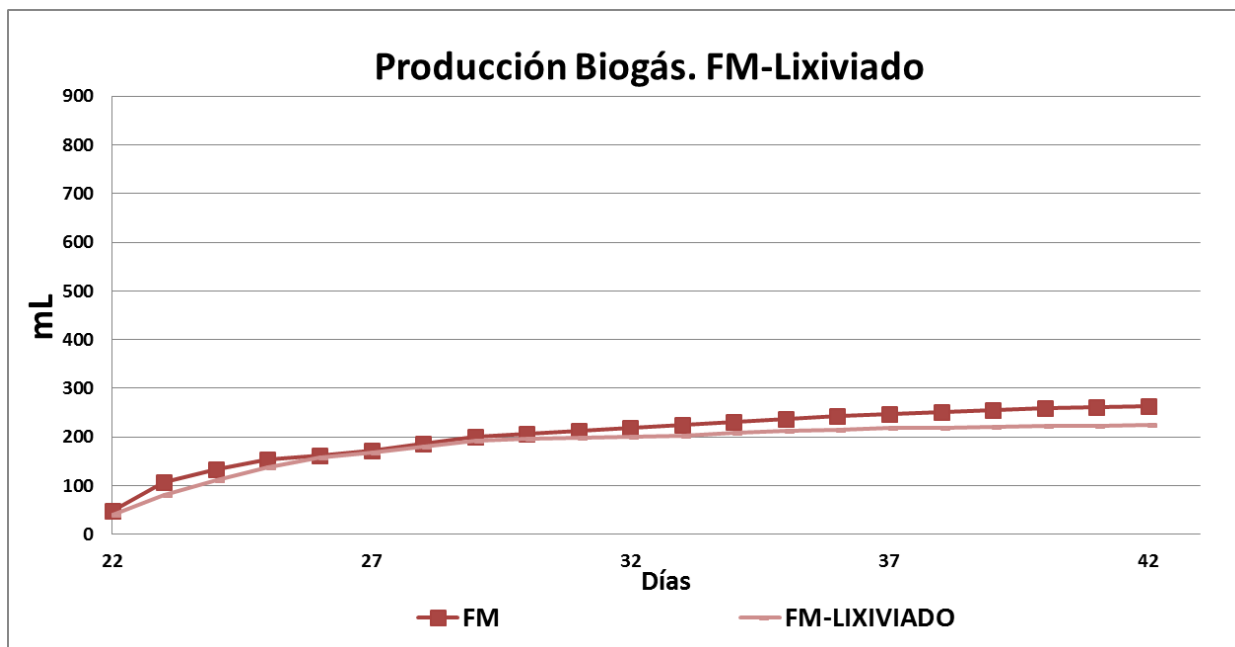
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de co-digestión anaerobia con fango mixto y lixiviado. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de fango mixto y lixiviado.

Como se representa en la gráfica 89 con respecto a la **fase 1**, la adición de la mezcla de FM-Lixiviado no aumenta la producción de biogás. La mezcla FM-Lixiviado, genera un volumen total de biogás de 146 mL. En comparación con el fango mixto (253mL), disminuye la producción de biogás en un 107 mL



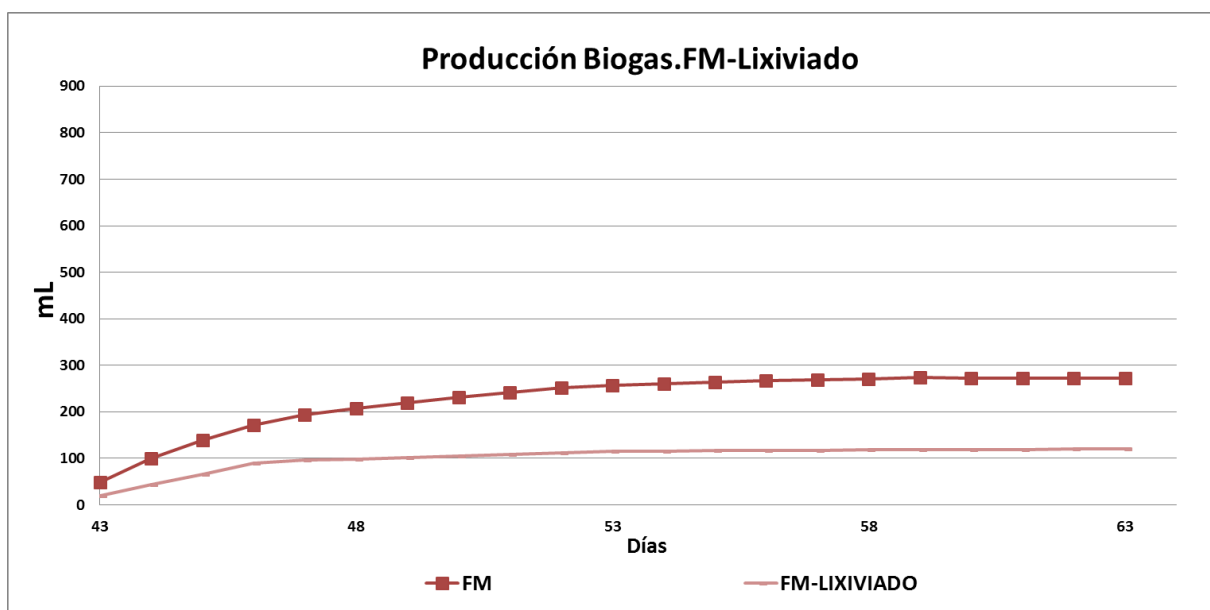
Gráfica 89. Producción Biogás FM-Lixiviado, Co-digestión Fase 1

En la **fase 2**, como se representa en la gráfica 90. El ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y lixiviado no aumenta la producción de biogás. Cabe destacar que del día 26 al 30 presentan la misma producción de biogás. La mezcla FM-Lixiviado, genera un volumen total de biogás de 225 mL. En comparación con el fango mixto (263 mL), disminuye la producción de biogás en 38 mL.



Gráfica 90. Producción Biogás FM-Lixiviado, Co-digestión Fase 2

Como se puede observar en la gráfica 91 de la **fase 3** del ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y lixiviado. La producción de biogás de la mezcla del fango mixto y lixiviado es menor a la producción de biogás del fango mixto. Cabe destacar que del día 43 al 46 presenta un aumento en la producción de biogás, estabilizándose a partir de este día. La mezcla FM-Lixiviado, genera un volumen total de biogás de 121 mL. En comparación con el fango mixto (272 mL), disminuye la producción de biogás en un 151 mL

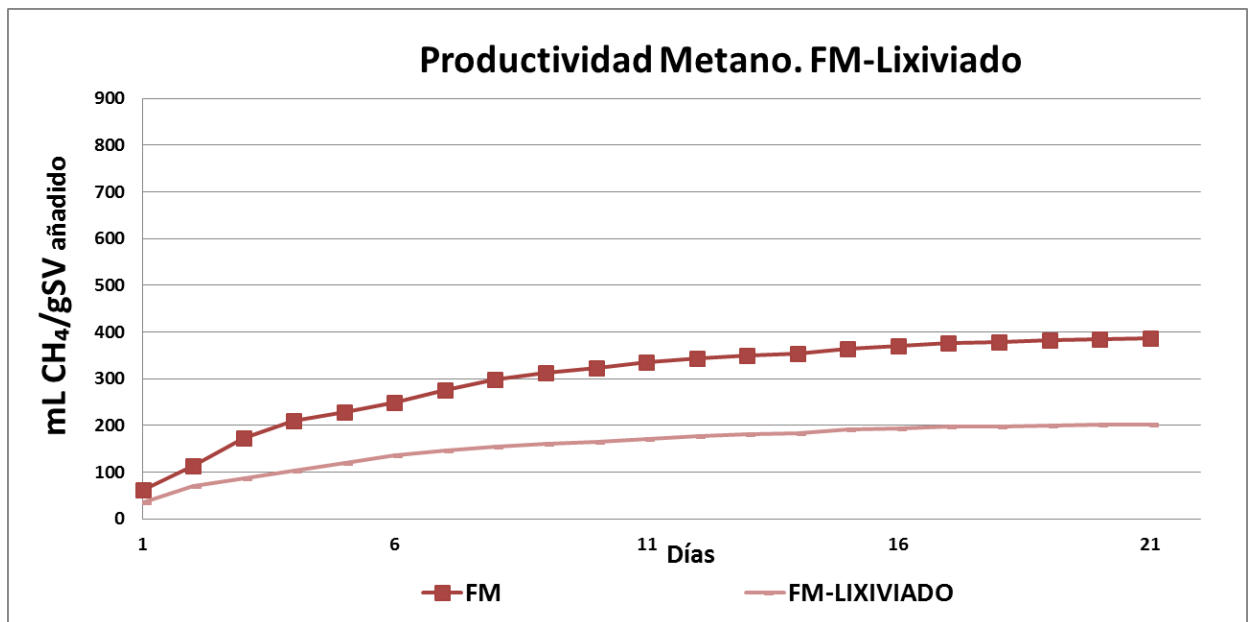


Gráfica 91. Producción Biogás FM-Lixiviado, Co-digestión Fase 3

### 5.2.6.2. Productividad de Metano

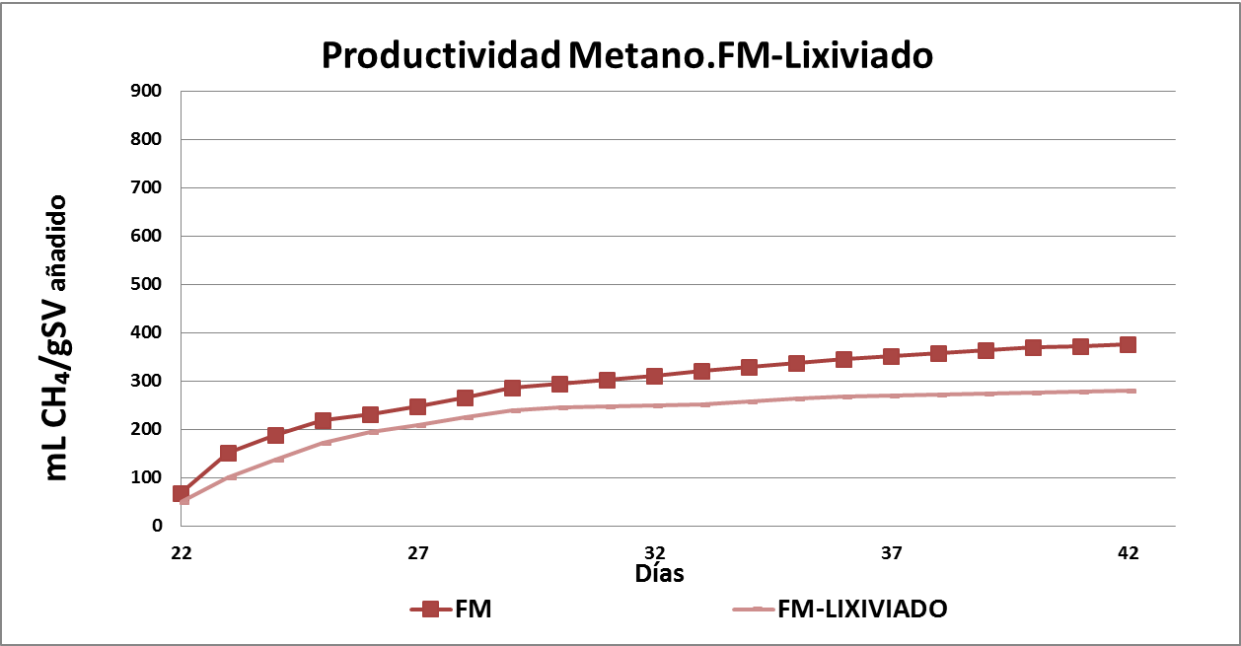
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y lixiviado, de las distintas fases temporales.

En cuanto a la productividad de metano de la **fase 1**(gráfica 92), la mezcla de FM-Lixiviado, presenta una productividad de 202 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, inferior a la del fango mixto 386 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



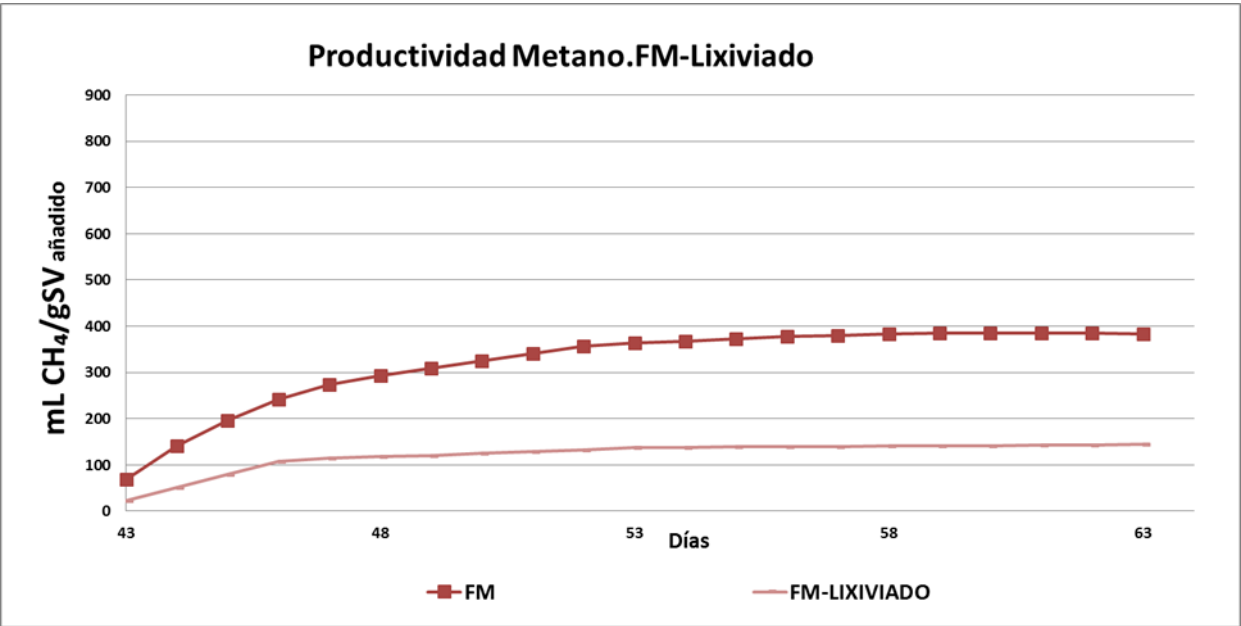
Gráfica 92. Productividad Metano FM-Lixiviado, Co-digestión Fase 1

En la **fase 2** con respecto a la productividad de metano, la mezcla de FM-Lixiviado, presenta una productividad de 280 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, inferior a la del fango mixto 375 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>. Tal y como se observa en la gráfica 93.



Gráfica 93. Productividad Metano FM-Lixiviado, Co-digestión Fase 2

En cuanto a la productividad de metano de la **fase 3**, como se representa en la gráfica 94. La mezcla de FM-Lixiviado, presenta una productividad de 144 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, inferior a la del fango mixto 384 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 94. Productividad Metano FM-Lixiviado, Co-digestión Fase 3

#### **5.2.6.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases. En la primera fase el porcentaje de metano en el ensayo con la mezcla FM-Lixiviado es del 65%, un 10% menor con respecto al ensayo del fango mixto (75%). En la fase 2 y 3, el porcentaje de metano en el ensayo con la mezcla FM-Lixiviado es del 65%, un 5% menor con respecto al ensayo del fango mixto (70%).

A la vista de los resultados, la adición de la mezcla Lixiviado junto al fango mixto en una co-digestión anaerobia ha conducido a una disminución en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al fango mixto.

### 5.2.7. Ensayo Co-digestión de Fango Mixto y Alpechín

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y alpechín. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

Res pecto a los resultados analíticos de la **fase 1** (tabla 51), se puede observar que el porcentaje de eliminación de materia orgánica en el caso de la mezcla FM-Alpechín es del 59%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es de 36%, al igual que el porcentaje de eliminación de los sólidos volátiles del 36%. La alcalinidad aumenta a la salida del ensayo hasta un  $6.740,09 \pm 1,06 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . La conductividad aumenta hasta un  $12,48 \pm 0,02 \text{ mS cm}^{-1}$  y, la relación AGV/ alcalinidad disminuye de un 0,14 a un 0,03.

Tabla 51. Ensayo FM-Alpechín, Co-digestión Fase 1

#### Fango Mixto –Alpechín

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$20.905,12 \pm 0,77$	$8.586,25 \pm 0,80$	59
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$15.915,45 \pm 0,90$	$10.195,90 \pm 0,88$	36
Materia Seca	%	1,59	1,02	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$12.345,10 \pm 0,87$	$7.945,15 \pm 0,85$	36
Materia Volátil	%	77,57	77,93	
pH		$7,99 \pm 0,01$	$7,74 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$6,47 \pm 0,02$	$12,48 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.775,51 \pm 1,08$	$6.740,09 \pm 1,06$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$517,24 \pm 1,04$	$233,79 \pm 0,99$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$620,69 \pm 1,04$	$280,55 \pm 0,99$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,14	0,03	



En la tabla 52 se muestran los resultados analíticos de la **fase 2**, se puede observar que el porcentaje de eliminación de DQO en el caso de la mezcla FM-Alpechín es del 51%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es de 39%, superior al porcentaje de eliminación de los sólidos volátiles del 35%. La alcalinidad aumenta a la salida del ensayo hasta un  $7.240,25 \pm 1,07 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . La conductividad aumenta hasta un  $12,48 \pm 0,02 \text{ mS cm}^{-1}$  y, la relación AGV/ alcalinidad disminuye de un 0,13 a un 0,03.

Tabla 52. Ensayo FM-Alpechín, Co-digestión Fase 2

**Fango Mixto –Alpechín**

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$21.356,06 \pm 0,78$	$10.497,11 \pm 0,80$	51
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$18.295,12 \pm 0,90$	$11.195,36 \pm 0,85$	39
Materia Seca	%	1,83	1,12	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$10.055,78 \pm 0,88$	$6.545,95 \pm 0,82$	35
Materia Volátil	%	54,96	58,46	
pH		$7,46 \pm 0,01$	$7,74 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$7,31 \pm 0,02$	$12,48 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.183,14 \pm 1,00$	$7.240,25 \pm 1,07$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$535,36 \pm 0,92$	$195,45 \pm 0,99$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$342,87 \pm 0,92$	$234,08 \pm 0,99$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,13	0,03	

En la **fase 3** (tabla 53), se puede observar que el porcentaje de eliminación de materia orgánica en el ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y alpechín es del 53%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es de 37%, al igual que el porcentaje de eliminación de los sólidos volátiles del 35%. La alcalinidad aumenta a la salida del ensayo hasta un  $8.600,33 \pm 1,04 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . La conductividad aumenta hasta un  $12,48 \pm 0,02 \text{ mS cm}^{-1}$  y, la relación AGV/ alcalinidad disminuye de un 0,13 a un 0,05.

Tabla 53. Ensayo FM-Alpechín, Co-digestión Fase 3

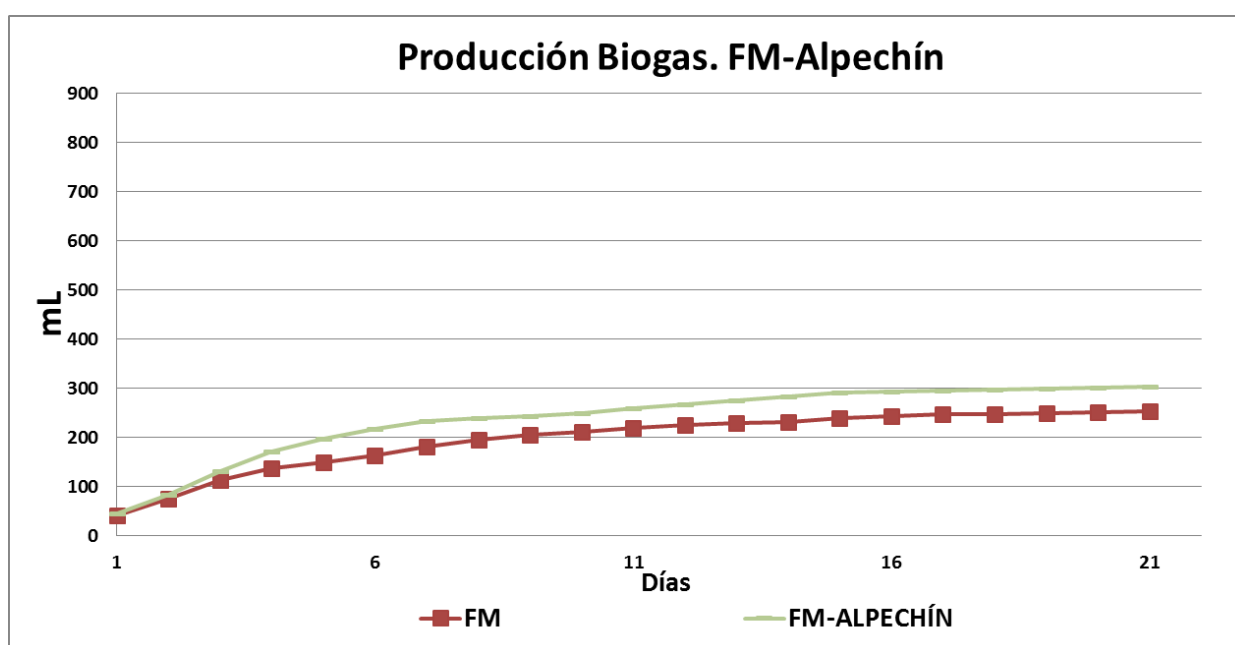
#### Fango Mixto –Alpechín

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$22.310,14 \pm 0,70$	$10.450,18 \pm 0,74$	53
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$17.680,23 \pm 0,80$	$11.200,21 \pm 0,86$	37
Materia Seca	%	1,77	1,12	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$10.210,51 \pm 0,85$	$6.620,54 \pm 0,88$	35
Materia Volátil	%	57,75	59,11	
pH		$7,46 \pm 0,01$	$7,74 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$7,31 \pm 0,02$	$12,48 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.183,70 \pm 1,08$	$8.600,33 \pm 1,04$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$534,48 \pm 0,95$	$400,44 \pm 1,03$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$341,38 \pm 0,95$	$480,66 \pm 1,03$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,13	0,05	

### 5.2.7.1. Producción de Biogás

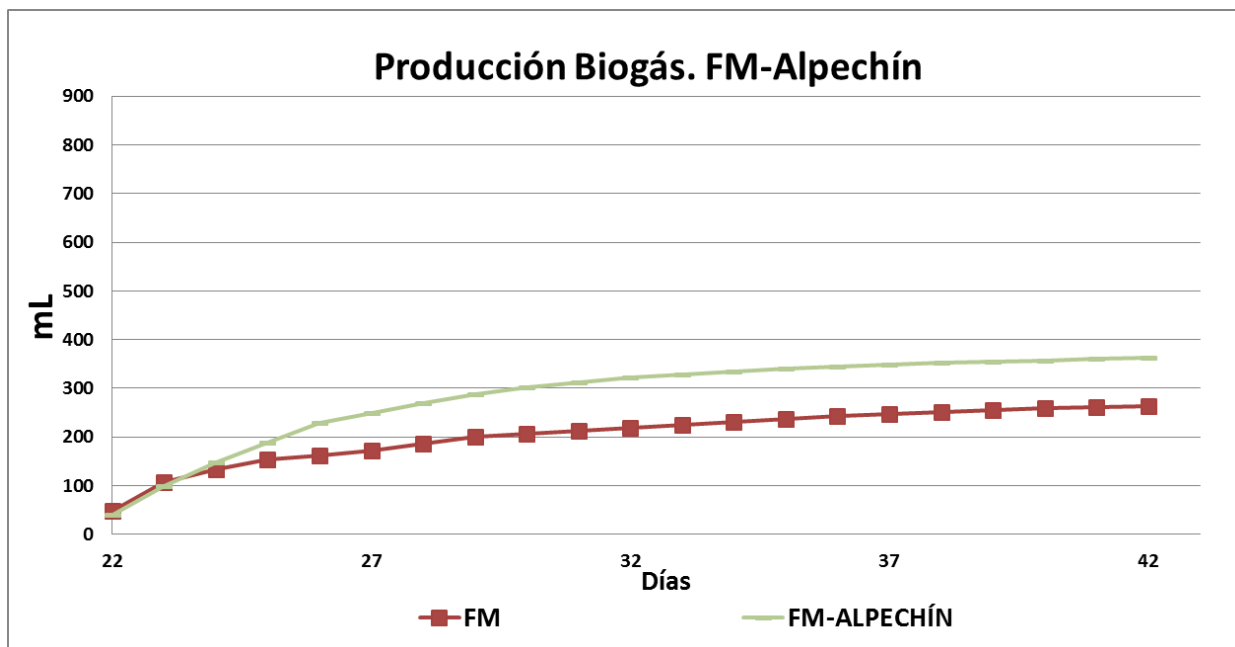
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de co-digestión anaerobia con fango mixto y alpechín. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de fango mixto y alpechín.

En la **fase 1**, como se representa en la gráfica 95. La producción de biogás presenta un crecimiento hasta el día 3 (similar al crecimiento del fango mixto). A partir del día 4, presenta un incremento de la producción de biogás hasta el día 15, estabilizándose. La mezcla FM-Alpechín genera una producción total de biogás de 303 mL Con respecto al fango mixto (253mL), la mezcla FM-Alpechín (472mL) incrementa la producción de biogás en 50 mL.



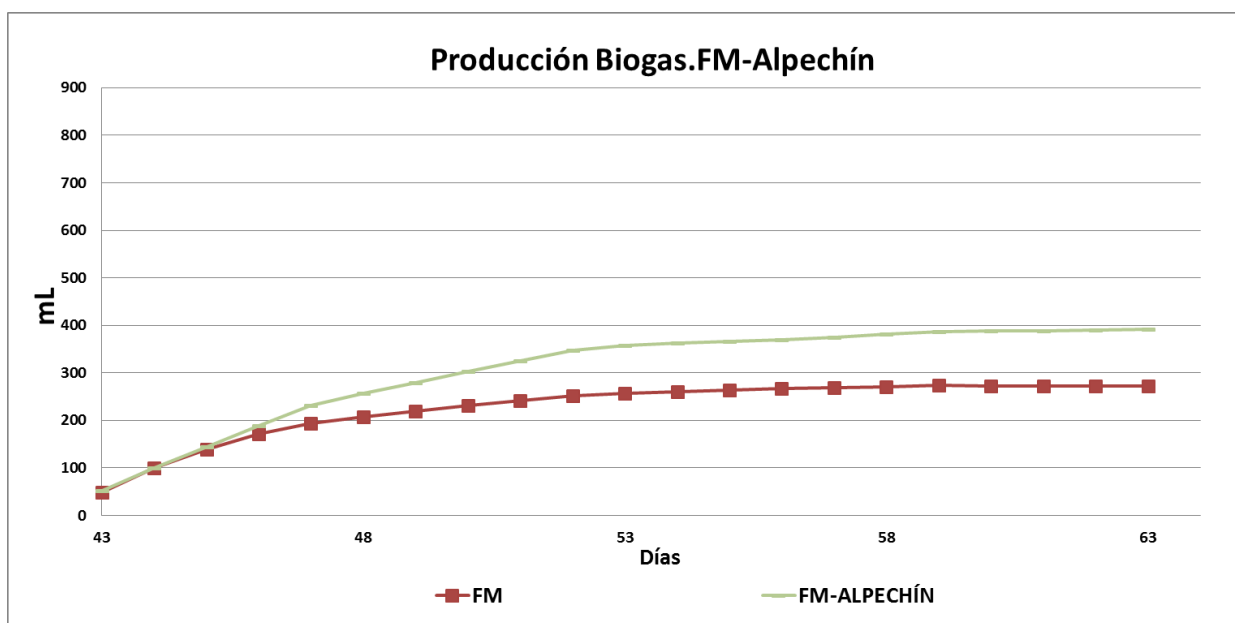
Gráfica 95. Producción Biogás FM-Alpechín, Co-digestión Fase 1

En la **fase 2**, la producción de biogás presenta un crecimiento hasta el día 24 (similar al crecimiento del fango mixto). A partir del día 24, presenta un incremento de la producción de biogás hasta el día 37, estabilizándose. La mezcla FM-Alpechín genera una producción total de biogás de 363 mL Con respecto al fango mixto (263 mL), la mezcla FM-Alpechín (363 mL) incrementa la producción de biogás en 100 mL, tal y como se representa en la gráfica 96.



Gráfica 96 Producción Biogás FM-Alpechín, Co-digestión Fase 2

Como se muestra en la gráfica 97, que corresponde con la **fase 3** del ensayo. La producción de biogás presenta un crecimiento hasta el día 46 (similar al crecimiento del fango mixto). A partir del día 46, presenta un incremento de la producción de biogás hasta el día 58, estabilizándose. La mezcla FM-Alpechín genera una producción total de biogás de 392 mL. Con respecto al fango mixto (272 mL), la mezcla FM- Alpechín (392 mL) incrementa la producción de biogás en 120 mL.

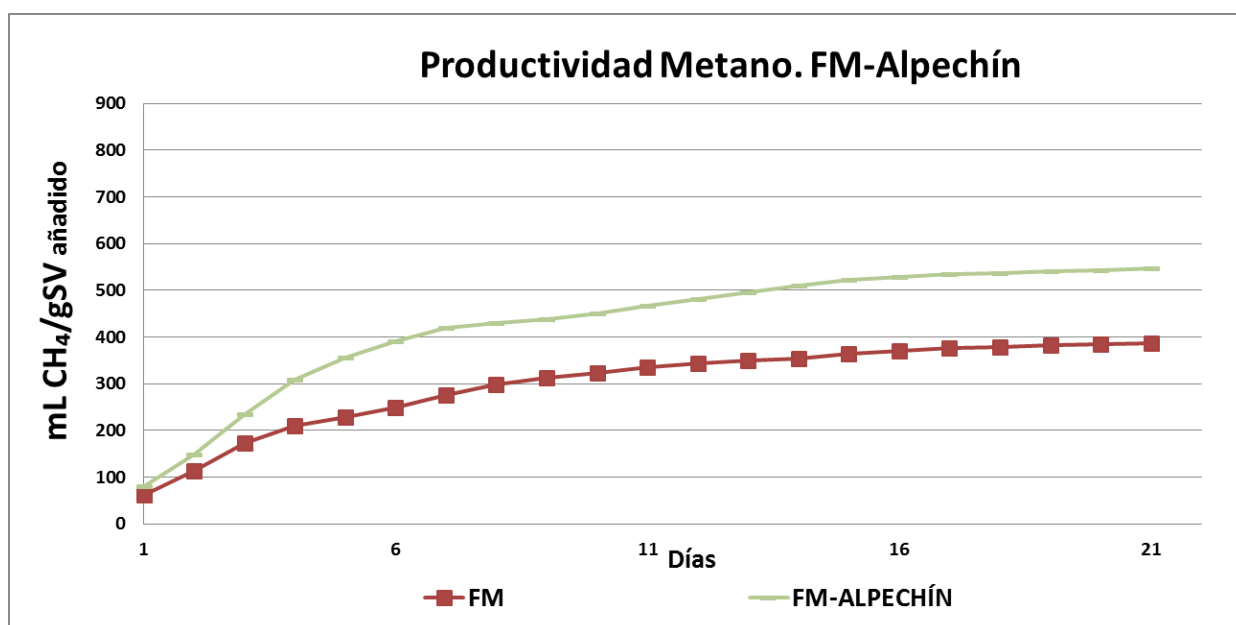


Gráfica 97 Producción Biogás FM-Alpechín, Co-digestión Fase 3

### 5.2.7.2. Productividad de Metano

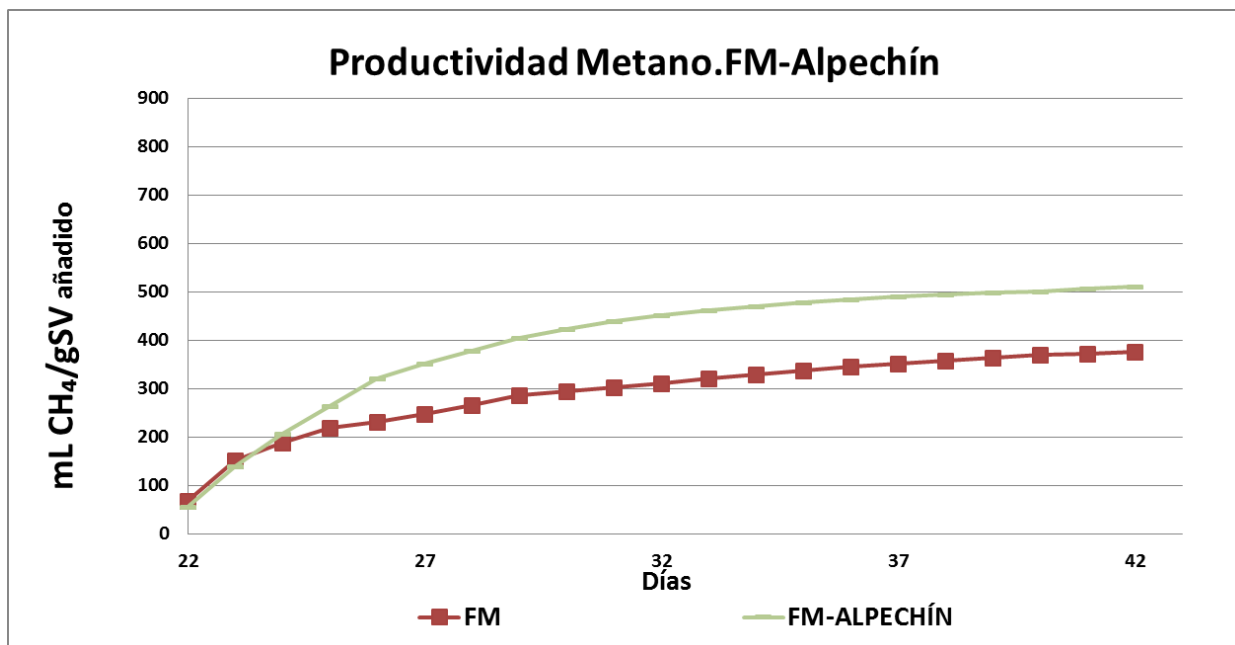
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y alpechín, de las distintas fases temporales.

En la **fase 1**, como se observa en la gráfica 98, la productividad de metano en la mezcla de FM-Alpechín es de 547 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, es superior a la del fango mixto 386 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



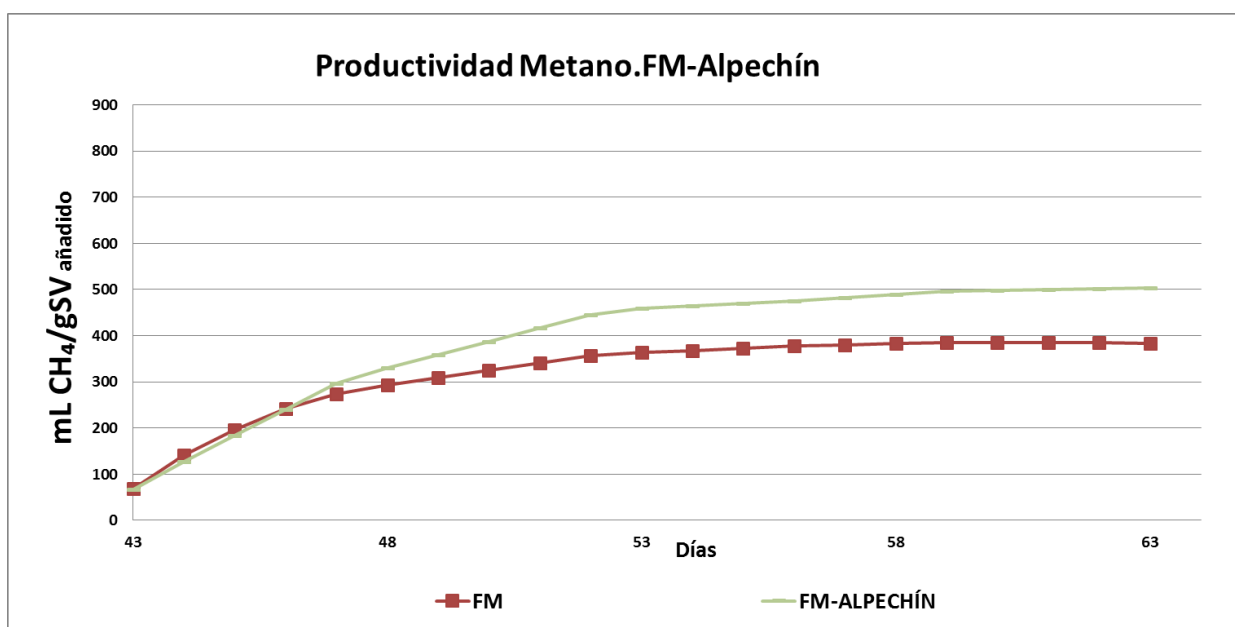
Gráfica 98. Productividad Metano FM-Alpechín, Co-digestión Fase 1

Como se observa en la gráfica 99 que corresponde con la **fase 2**, la productividad de metano en la mezcla de FM-Alpechín es de 511 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, es superior a la del fango mixto 375 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 99. Productividad Metano FM-Alpechín, Co-digestión Fase 2

En la **fase 3** como se muestra en la gráfica 100, la productividad de metano en la mezcla de FM-Alpechín es de 503 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, es superior a la del fango mixto 384 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 100. Productividad Metano FM-Alpechín, Co-digestión Fase 3

#### **5.2.7.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases. En la primera fase, el porcentaje de metano en el ensayo con la mezcla FM-Alpechín es del 75%, al igual que el ensayo del fango mixto (75%). En la fase 2 y 3, el porcentaje de metano en el ensayo con la mezcla FM-Alpechín es del 75%, superior un 5% al ensayo del fango mixto (70%).

A la vista de los resultados, la adición de la mezcla FM-Alpechín en una co-digestión anaerobia ha conducido a un incremento en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al fango mixto.

### 5.2.8. Ensayo Co-digestión de Fango Mixto y Aceite usado de cocina

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y aceite usado de cocina. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1**, se observa que la mezcla de FM-Aceite presenta una eliminación de DQO del 51%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es del 28% y 29%, respectivamente. La relación AGV/ alcalinidad, disminuye de un 0.08 a un 0.05. Cabe destacar, la reducción del pH de un  $8,25 \pm 0,0$  hasta un  $6,91 \pm 0,01$ , tal y como se muestra en la tabla 54.

Tabla 54. Ensayo FM-Aceite, Co-digestión Fase 1

#### Fango Mixto Aceite

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	29.690,12 $\pm$ 0,77	14.659,36 $\pm$ 0,80	51
ST	mg L <sup>-1</sup>	26.120,45 $\pm$ 0,88	18.710,11 $\pm$ 0,85	28
Materia Seca	%	2,61	1,87	
SV	mg L <sup>-1</sup>	18.045,07 $\pm$ 0,87	12.810,05 $\pm$ 0,90	29
Materia Volátil	%	69,08	68.47	
pH		8,25 $\pm$ 0,01	6,91 $\pm$ 0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	10,89 $\pm$ 0,02	12,01 $\pm$ 0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	6.632,50 $\pm$ 1,07	5.198,14 $\pm$ 1,04	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	551,72 $\pm$ 1,01	269,48 $\pm$ 0,98	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	662,07 $\pm$ 1,01	323,38 $\pm$ 0,98	
Relación AGV/Alcalinidad		0,08	0,05	



En la tabla 55 que corresponde con la **fase 2**, se observa que la mezcla de FM-Aceite presenta una eliminación de DQO del 40%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es del 30% y 25%, respectivamente. La relación AGV/alcalinidad, disminuye de un 0.25 a un 0.13. Cabe destacar, la reducción del pH de un  $7,29 \pm 0,01$  hasta un  $6,91 \pm 0,01$ .

Tabla 55. Ensayo FM-Aceite, Co-digestión Fase 2

**Fango Mixto Aceite**

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	27.553,48 ±0,77	16.565,25 ±0,79	40
ST	mg L <sup>-1</sup>	28.230,09 ±0,80	19.710,11 ±0,84	30
Materia Seca	%	2,82	1,97	
SV	mg L <sup>-1</sup>	21.205,12 ±0,85	15.810,33 ±0,90	25
Materia Volátil	%	75,12	80,21	
pH		7,29 ±0,01	6,91 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	7,52 ±0,02	12,01 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	3.995,45 ±1,00	8.600,10 ±1,07	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	998,25 ±0,95	1.101,89 ±1,03	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	1.197,22 ±0,95	1.321,36 ±1,03	
Relación AGV/Alcalinidad		0,25	0,13	

Los resultados analíticos de la **fase 3**, como se observa en la tabla 56. La mezcla de FM-Aceite presenta una eliminación de materia orgánica del 44%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es del 31% y 37%, respectivamente. La relación AGV/ alcalinidad, disminuye de un 0.25 a un 0.18. Cabe destacar, la reducción del pH de un  $7,29 \pm 0,01$  hasta un  $6,91 \pm 0,01$ .

Tabla 56. Ensayo FM-Aceite, Co-digestión Fase 3

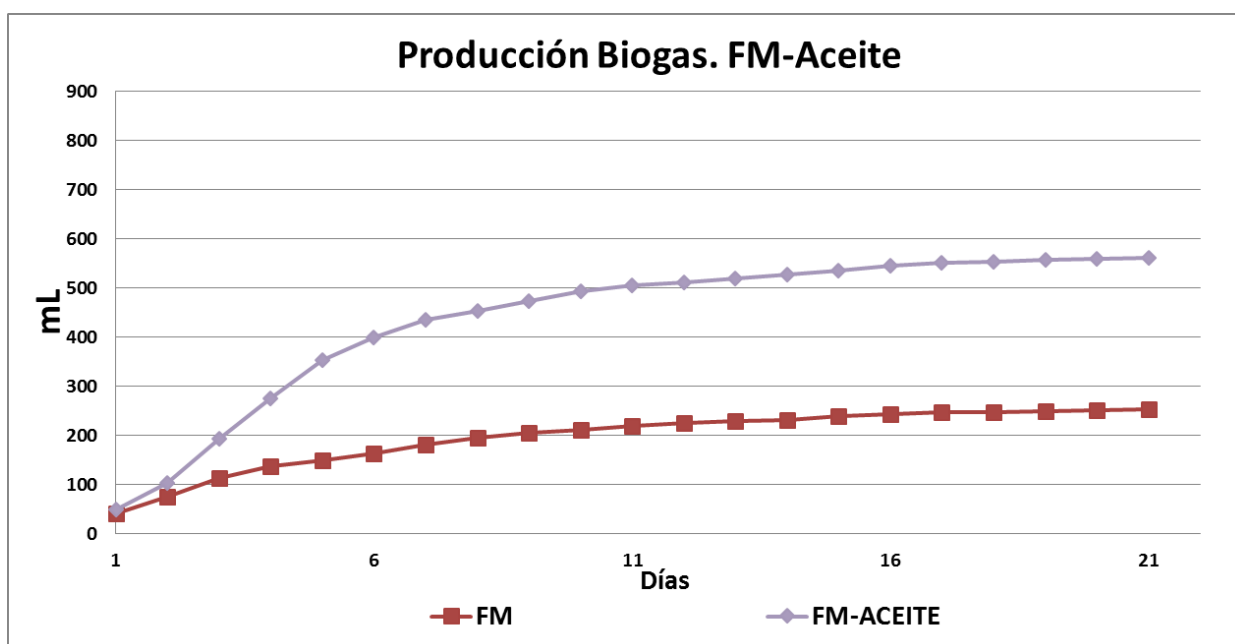
**Fango Mixto Aceite**

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	30.145,66 ±0,80	16.989,87 ±0,78	44
ST	mg L <sup>-1</sup>	25.400,55 ±0,90	17.520,56 ±0,84	31
Materia Seca	%	2,54	1,75	
SV	mg L <sup>-1</sup>	22.610,01 ±0,85	14.250,08 ±0,81	37
Materia Volátil	%	89,02	81,34	
pH		7,29 ±0,01	6,91 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	7,52 ±0,02	12,01 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	4.081,63 ±1,07	7.800,87 ±1,02	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	1.000,52 ±0,92	1.379,14 ±0,99	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	1.200,47 ±0,92	1.655,96 ±0,99	
Relación AGV/Alcalinidad		0,25	0,18	

### 5.2.8.1. Producción de Biogás

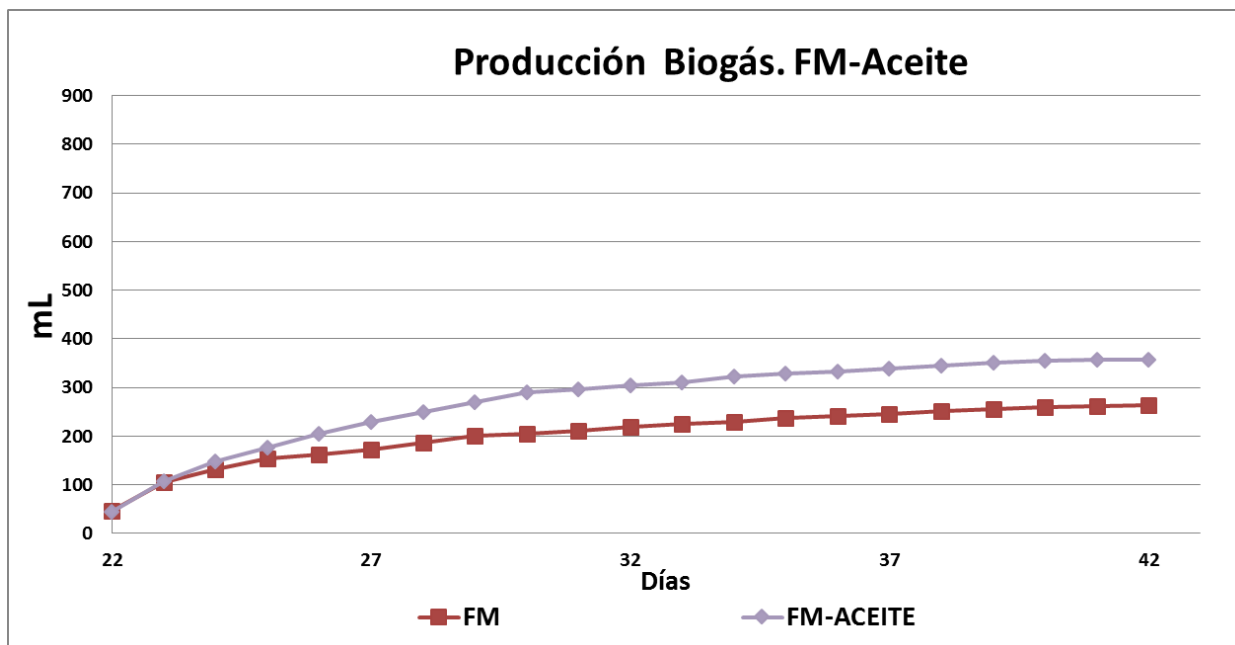
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de co-digestión anaerobia con fango mixto y aceite usado de cocina. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de fango mixto y cascara de arroz.

En la **fase 1** como se puede observar en la gráfica 101, la mezcla del fango mixto con el aceite presenta un crecimiento exponencial hasta el día 6, a partir del cual este crecimiento no es tan notorio, estabilizándose a partir del día 11. El FM-Aceite genera una producción total de biogás de 561 mL. Con respecto al Fango mixto (253 mL), la mezcla de FM-Aceite (561 mL) incrementa la producción de biogás en 308 mL.



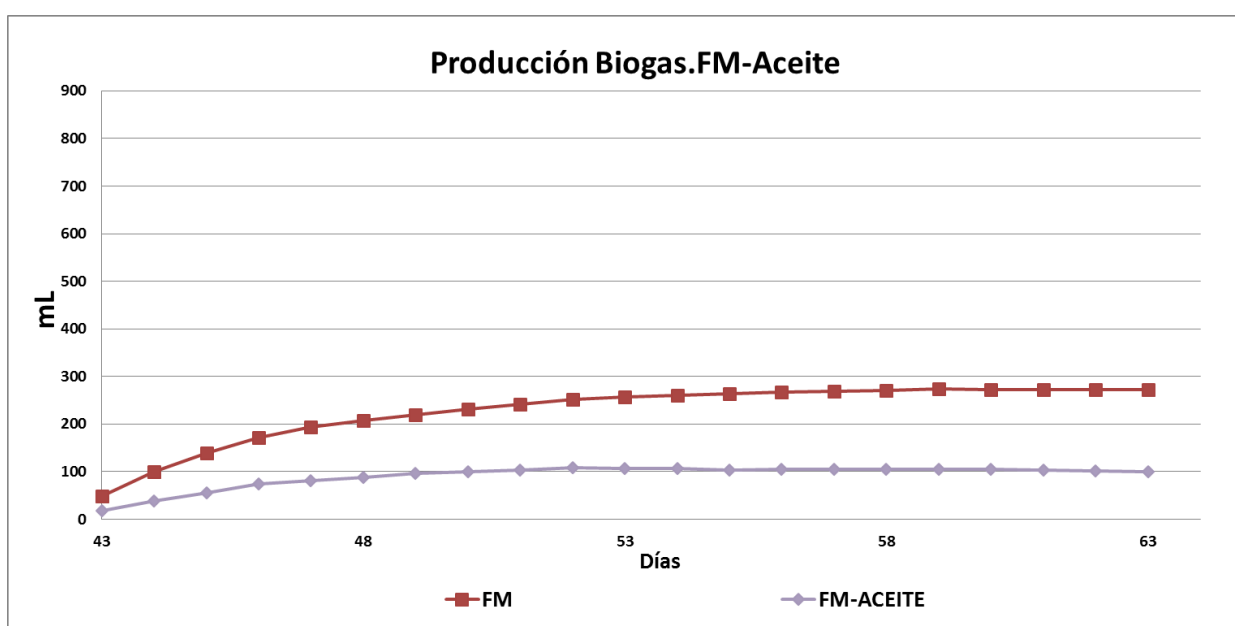
Gráfica 101. Producción Biogás FM-Aceite, Co-digestión Fase 1

En la **fase 2**, la mezcla del fango mixto con el aceite presenta un crecimiento hasta el día 24 (similar al fango mixto). A partir del día 24 presenta un crecimiento superior al fango mixto, estabilizándose a partir del día 36. El FM-Aceite genera una producción total de biogás de 357 mL. Con respecto al Fango mixto (263 mL) la mezcla de FM-Aceite (357 mL) incrementa la producción de biogás en 94 mL, tal y como observa en la gráfica 102.



Gráfica 102. Producción Biogás FM-Aceite, Co-digestión Fase 2

Como se puede observar en la gráfica 103 que corresponde con la producción de biogás de la **fase 3**, la mezcla del fango mixto con el aceite presenta un crecimiento hasta el día 47, estabilizándose. El FM-Aceite genera una producción total de biogás de 100 mL. Con respecto al Fango mixto (272 mL) la mezcla de FM-Aceite (100 mL) disminuye la producción de biogás en 100 mL.

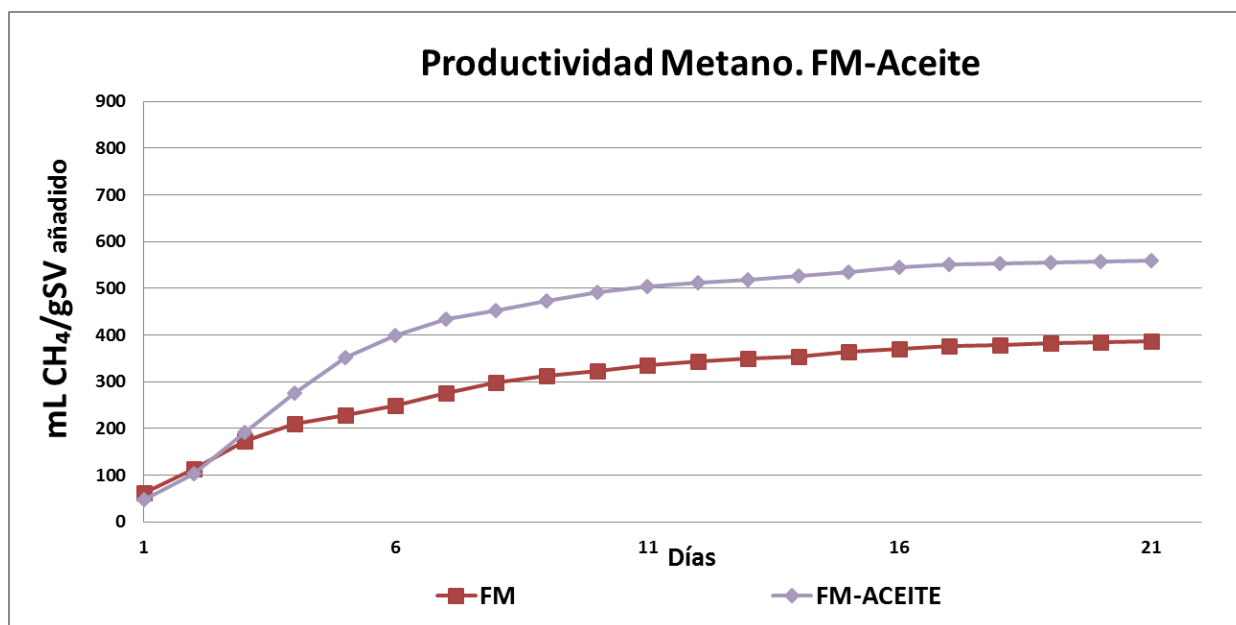


Gráfica 103. Producción Biogás FM-Aceite, Co-digestión Fase 3

### 5.2.8.2. Productividad de Metano

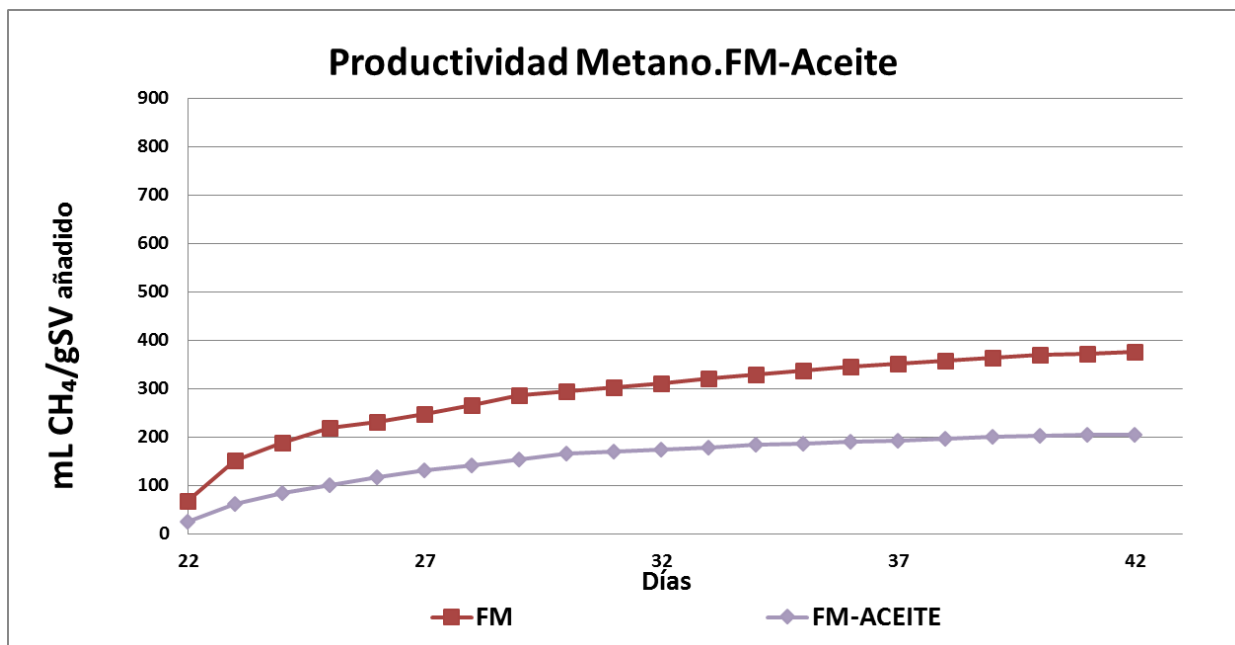
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y aceite usado de cocina, de las distintas fases temporales.

En la **fase 1** como se muestra en la gráfica 104, la productividad de metano en la mezcla FM-Aceite, 560 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, es superior a la del fango mixto (386 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).



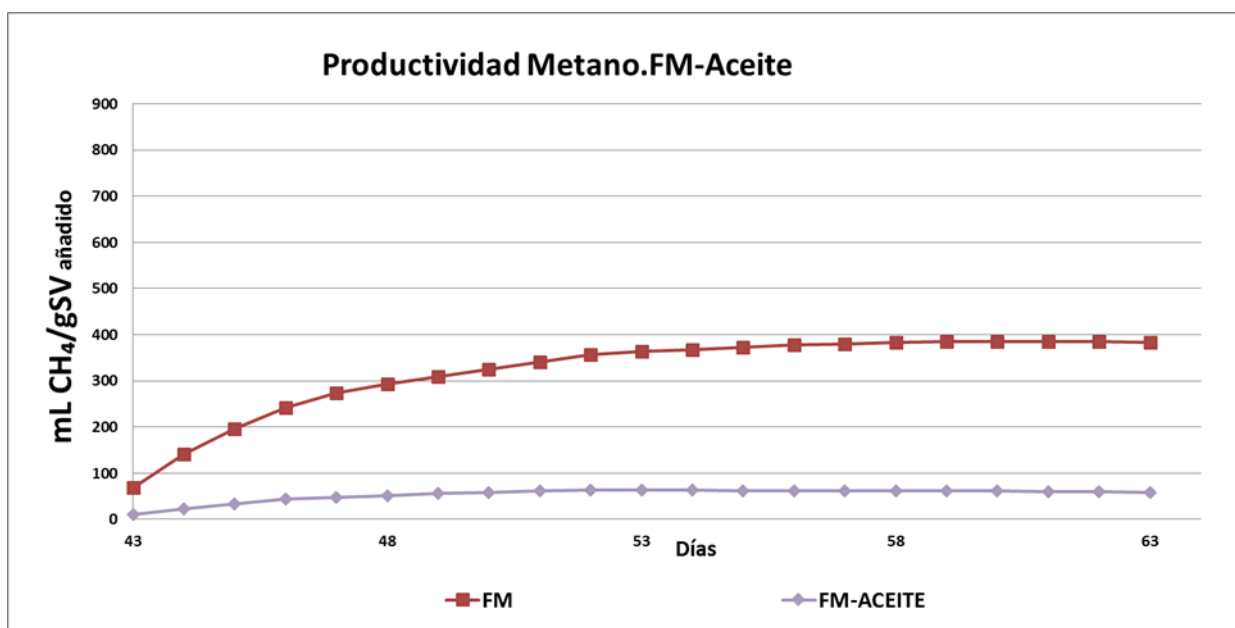
Gráfica 104. Productividad Metano FM-Aceite, Co-digestión Fase 1

Como se muestra en la gráfica 105 de la **fase 2**, la productividad de metano del ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y aceite usado de cocina la productividad de metano en la mezcla FM-Aceite, 204 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, es inferior a la del fango mixto (375 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).



Gráfica 105. Productividad Metano FM-Aceite, Co-digestión Fase 2

Como se muestra en la gráfica 106, respecto a la **fase 3**, la productividad de metano en la mezcla FM-Aceite, 59 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, es bastante inferior a la del fango mixto (384 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).



Gráfica 106. Productividad Metano FM-Aceite, Co-digestión Fase 3

#### **5.2.8.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases. En la primera fase, La mezcla de FM-Aceite presenta un porcentaje de metano en el biogás del 68%, un 7% inferior al ensayo del fango mixto (75%). En la fase 2 y 3, La mezcla de FM-Aceite presenta un porcentaje de metano en el biogás del 68%, similar, al ensayo del fango mixto (70%).

A la vista de los resultados, la adición de la mezcla FM-Aceite en una co-digestión anaerobia ha conducido a un incremento en la primera fase, pero, a una disminución en la segunda y tercera, en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al fango mixto.

### **5.2.9. Comparación de la Co-digestión anaerobia de Fango mixto y residuos orgánicos.**

#### **5.2.9.1. Comparación de la Co-digestión anaerobia de Fango mixto y residuos orgánicos. Fase 1 (21 Días)**

Como consecuencia de los resultados obtenidos en el ensayo de digestión mono-sustrato y de la bibliografía estudiada, se plantea esta segunda etapa de investigación, con los siguientes resultados.

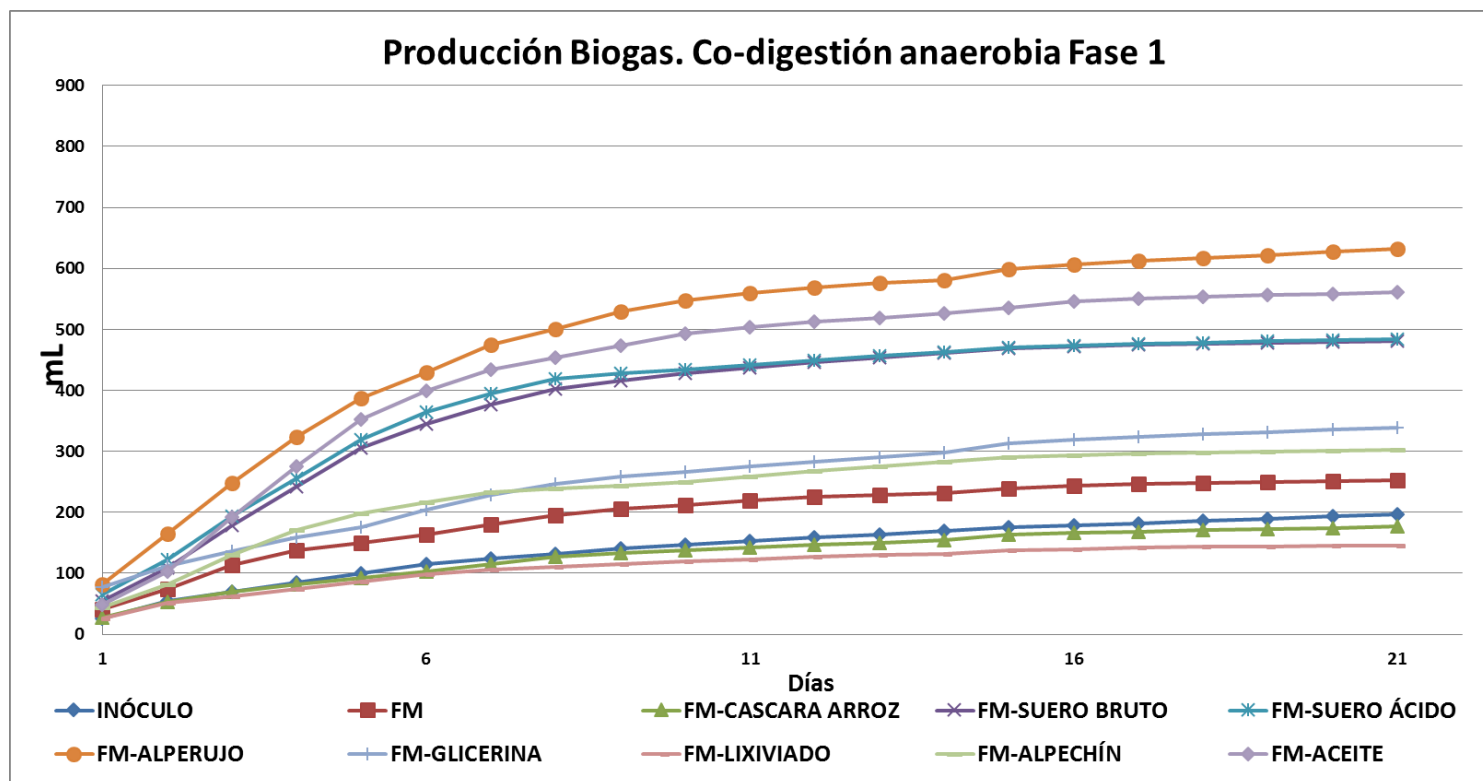
La **producción de biogás** correspondientes a los ensayos de Co-digestión de la fase 1 de los diferentes residuos junto al lodo de depuradora, se han representado en la gráfica 107. Se puede observar de forma evidente, que la mezcla de FM-Alperujo es el que presenta mayor producción de biogás con 632 mL. El fango mixto junto con el aceite genera un volumen de biogás de 561 mL. Una producción similar tienen las mezclas de fango mixto con los residuos de la industria láctea. El FM-Suero Bruto y el FM-Suero ácido tienen una producción total de biogás de 481 mL y 484 mL, respectivamente. El FM-Alpechín y la mezcla FM-Glicerina tienen una producción total de biogás similar, 303 mL y 339 mL, respectivamente.

A diferencia del FM-Cascara Arroz (176 mL), todas las mezclas nombradas anteriormente tienen una producción de biogás, superior al fango mixto (253 mL). El inóculo presenta un volumen total de 197 mL.

En términos de **eliminación de materia orgánica**, es importante mencionar que todos los residuos presentan una eliminación de DQO por encima del inóculo, siendo muy significativo el alto porcentaje de eliminación del FM-Alperujo (62%). Cabe destacar que, el porcentaje de eliminación de materia orgánica de la mezcla FM-Cascara (41%), presenta una eliminación por debajo del fango mixto (51%), tal y como se muestra en la tabla 57.

Con respecto a los datos de **eliminación de sólidos**, es significativo el poco porcentaje de eliminación de sólidos volátiles de la mezcla de FM-Glicerina (21%). Por el contrario, el FM-Alpechín es la mezcla de residuos que presenta un mayor porcentaje de eliminación de SV (36%).





Gráfica 107. Producción Biogás, Co-digestión Fase 1

Tabla 57. Porcentajes Eliminación y Producción de Biogás, Co-digestión Fase 1

		Inóculo	Fango mixto	FM-Cascara	FM-SueroB	FM-SueroÁ	FM-Alperujo	FM-Glicerina	FM-Lixiviado	FM-Alpechín	FM-Aceite
DQO	%	31	51	41	56	57	62	52	51	59	51
ST	%	15	26	25	26	27	31	23	29	36	28
SV	%	10	23	22	35	33	34	21	25	36	29
Producción Biogás	mL	197	253	176	481	484	632	339	146	303	561

### 5.2.9.2. Comparación de la Co-digestión anaerobia de Fango mixto y residuos orgánicos. Fase 2 (42Días)

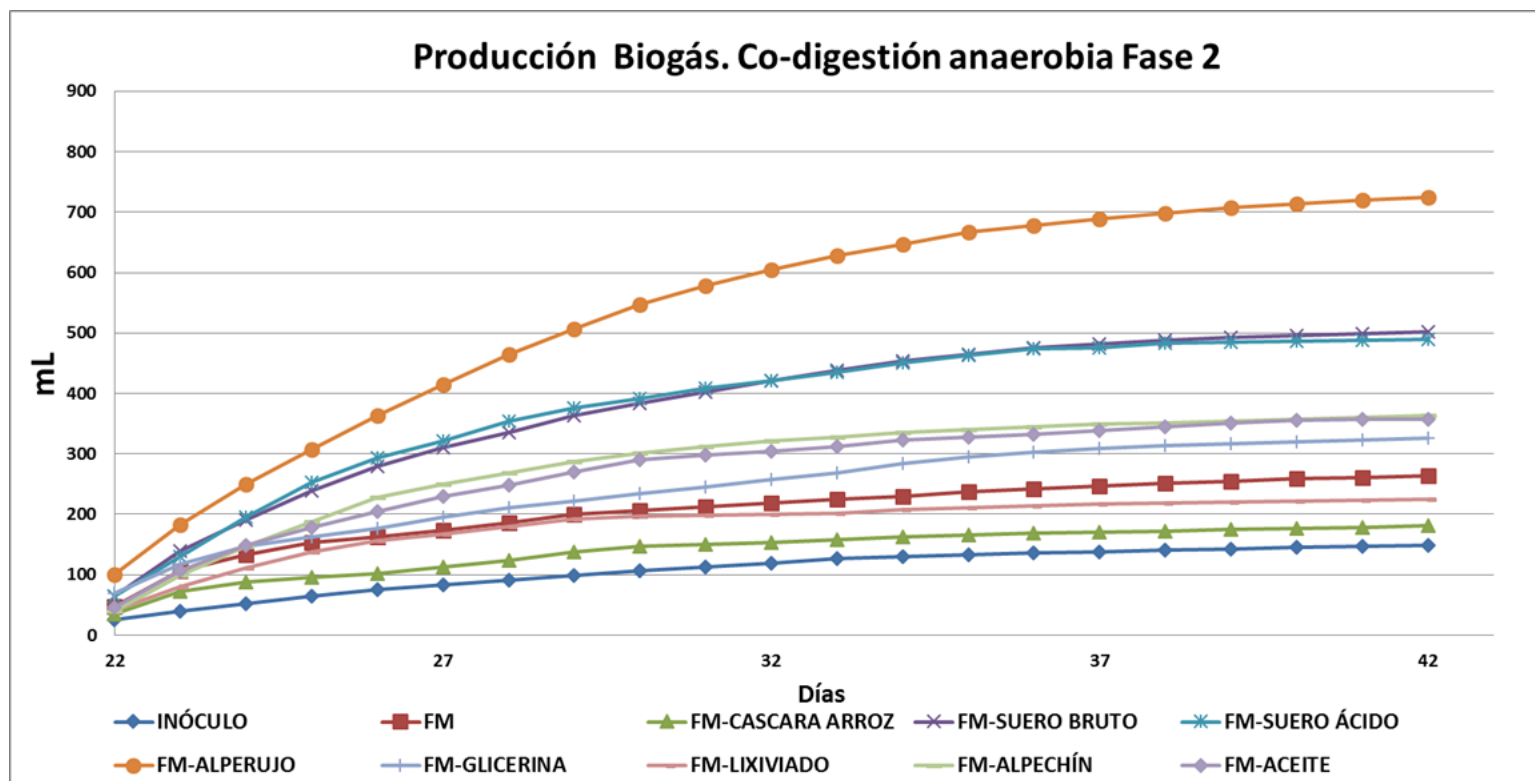
En el estudio de la segunda fase temporal del ensayo de co-digestión anaerobia se obtienen los siguientes resultados.

La **producción de biogás** correspondientes a los ensayos de Co-digestión de la fase 2 de los diferentes residuos orgánicos junto al lodo de depuradora, con fango adaptado procedente de la fase1, se han representado en la gráfica 108. Se puede observar de forma evidente, que la mezcla de FM-Alperujo es el que presenta mayor producción de biogás con 725 mL. Una producción por debajo, tienen las mezclas de fango mixto con los residuos de la industria láctea, el FM-Suero bruto y el FM-Suero ácido tienen una producción total de biogás de 502 mL y 489 mL, respectivamente. El FM-Alpechín y la mezcla FM-Aceite usado de cocina tienen una producción total de biogás similar, 363 mL y 357mL. El FM-Glicerina tiene una producción de biogás total de 327 mL.

A diferencia del FM-lixiviado (225 mL) y FM-Cascara Arroz (176 mL), todas las mezclas nombradas anteriormente tienen una producción de biogás, superior al fango mixto (263 mL). El inóculo presenta un volumen total de 149 mL.

Con respecto a la **eliminación de materia orgánica**, como se puede observar en la tabla 58, todos los residuos presentan una eliminación de DQO por encima del inóculo, siendo muy significativo el porcentaje de eliminación del FM-Alperujo (62%). El porcentaje de eliminación de DQO, de la mezcla FM-Aceite usado de cocina y FM- Glicerina (40% y 42%) respectivamente, presentan una eliminación por muy debajo del fango mixto (55%).

En cuanto a los datos de **eliminación de sólidos**, cabe destacar el poco porcentaje de eliminación de sólidos volátiles de la mezcla de FM-Glicerina (23%). Por el contrario, el FM-Suero ácido es la mezcla de residuos que presenta un mayor porcentaje de eliminación de SV (38%).



Gráfica 108. Producción Biogás, Co-digestión Fase 2

Tabla 58. Porcentajes Eliminación y Producción de Biogás, Co-digestión Fase 2

		Inóculo	Fango mixto	FM-Cascara	FM-SueroB	FM-SueroÁ	FM-Alperujo	FM-Glicerina	FM-Lixiviado	FM-Alpechín	FM-Aceite
DQO	%	51	55	46	57	62	62	42	48	51	40
ST	%	23	39	39	37	38	42	32	35	39	30
SV	%	16	26	33	33	38	34	23	25	35	25
Producción Biogás	mL	149	263	181	502	489	725	327	225	363	357

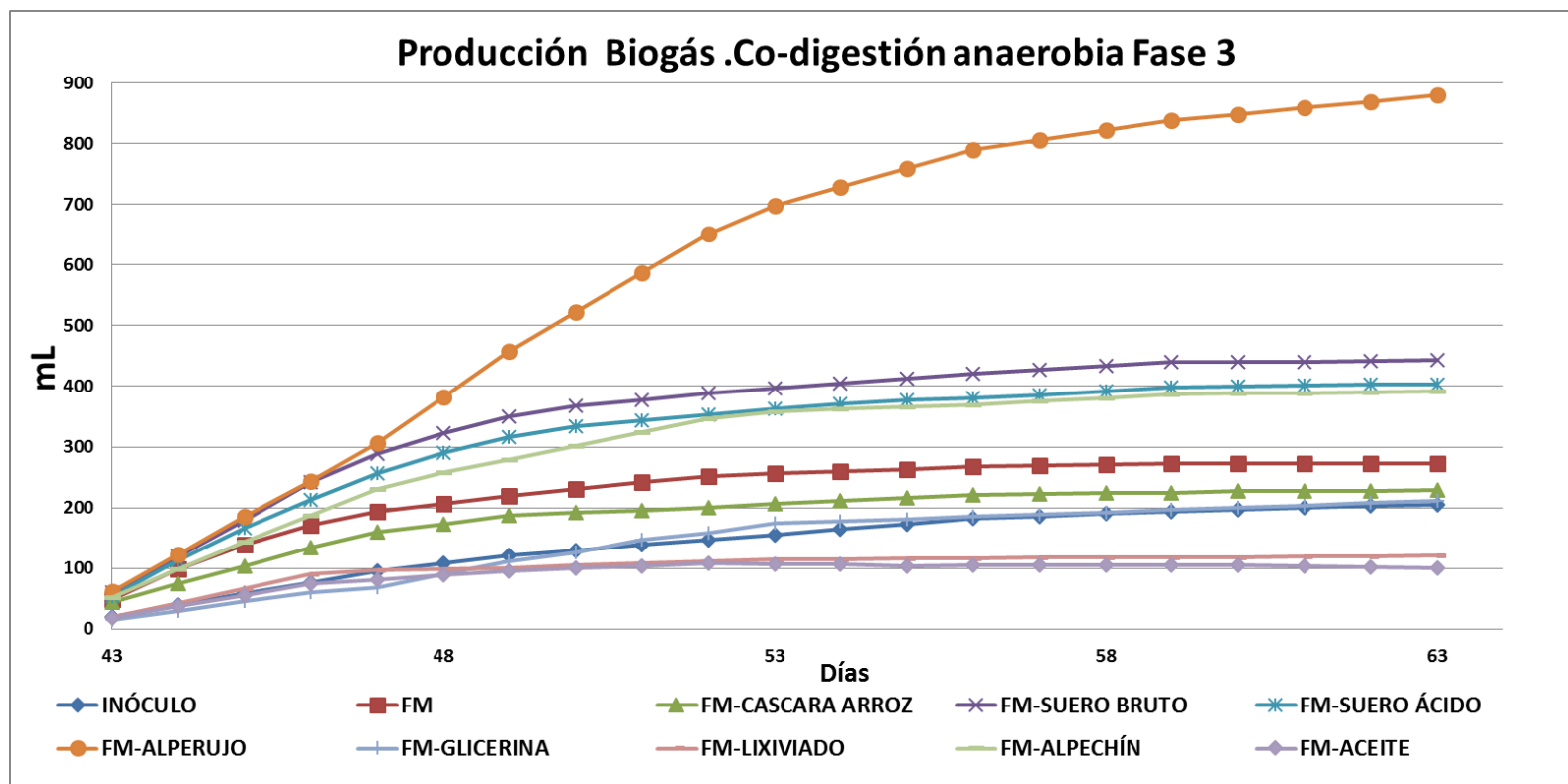
### 5.2.9.3. Comparación de la Co-digestión anaerobia de Fango mixto y residuos orgánicos. Fase 3 (63 Días)

En el estudio de la tercera fase temporal del ensayo de co-digestión anaerobia se obtienen los siguientes resultados.

La **producción de biogás** correspondientes a los ensayos de Co-digestión de la fase 3 de los diferentes residuos orgánicos junto al lodo de depuradora, con fango adaptado procedente de la fase 2, se han representado en la gráfica 109. Se puede observar de forma evidente, que, la mezcla de FM-Alperujo es el que presenta mayor producción de biogás con 880 mL. Una producción menor la tienen las mezclas de fango mixto con los residuos de la industria láctea. El FM-Suero Bruto y el FM-Suero ácido tienen una producción total de biogás de 443 mL y 404 mL, respectivamente. El FM-Alpechín tiene una producción total de biogás similar 392 mL, respectivamente. El fango mixto genera un volumen de biogás de 272 mL. Una producción similar la presentan, el FM-Cascara y FM-Glicerina, con 229 mL y 211 mL, respectivamente. A diferencia del FM-Lixiviado (121 mL) y, FM-Aceite usado de cocina (100 mL) presentan una producción de biogás, inferior al inóculo (206 mL).

Con respecto al porcentaje de **eliminación de materia orgánica** en los ensayos, como se puede observar en la tabla 59, cabe destacar el porcentaje de eliminación del FM-Alperujo (62%). La mezcla de FM-Glicerina (45%) y, FM-Aceite (44%) presentan una eliminación por debajo del fango mixto (49%).

En términos **eliminación de sólidos**, cabe destacar el poco porcentaje de eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles de la mezcla de FM-Glicerina (26% y 21%, respectivamente). Por el contrario, el FM-Suero ácido es la mezcla de residuos que presenta un mayor porcentaje de eliminación de SV (39%), tal y como se muestra en la tabla 59.

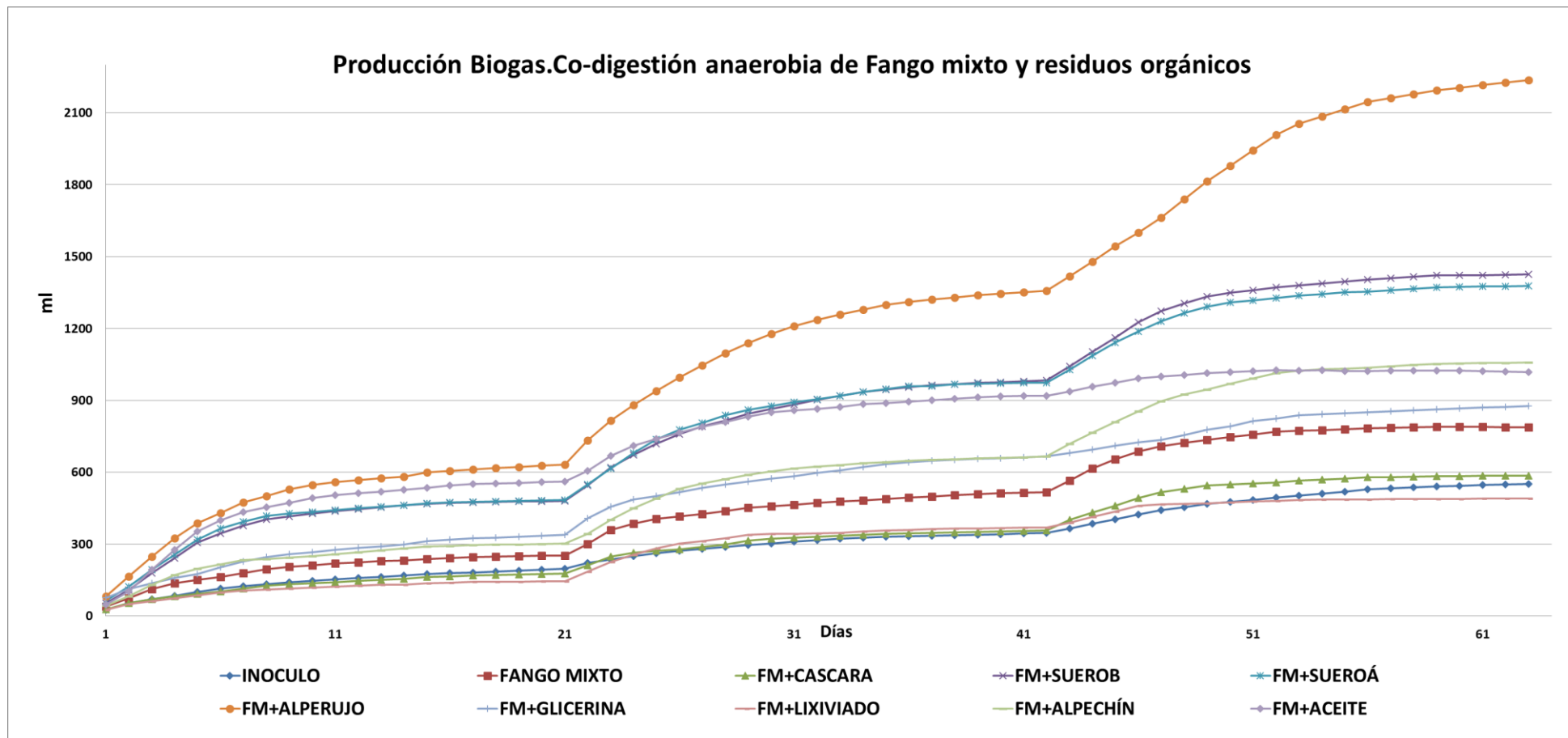


Gráfica 109.Producción Biogás, Co-digestión Fase 3

Tabla 59.Porcentajes Eliminación y Producción de Biogás, Co-digestión Fase 3

		Inóculo	Fango mixto	FM-Cascara	FM-SueroB	FM-SueroÁ	FM-Alperujo	FM-Glicerina	FM-Lixiviado	FM-Alpechín	FM-Aceite
<b>DQO</b>	%	47	49	47	59	60	62	45	48	57	44
<b>ST</b>	%	19	35	32	45	34	43	26	33	37	31
<b>SV</b>	%	17	33	34	34	39	35	21	26	35	37
<b>Producción Biogás</b>	mL	206	272	229	443	404	880	211	121	392	100

#### 5.2.9.4. Comparación ensayo Co-digestión anaerobia de Fango mixto y residuos orgánicos. Fases (1,2 y 3)



Gráfica 110. Producción Biogás Co-digestión

Tabla 60. Producción de Biogás. Co-digestión

<b>Producción Biogás</b>	<b>Inóculo</b>	<b>Fango mixto</b>	<b>FM-Cascara</b>	<b>FM-SueroB</b>	<b>FM-SueroÁ</b>	<b>FM-Alperujo</b>	<b>FM-Glicerina</b>	<b>FM-Lixiviado</b>	<b>FM-Alpechín</b>	<b>FM-Aceite</b>
<b>Fase 1</b>	197	253	176	481	484	632	339	146	303	561
<b>Fase 2</b>	149	263	181	502	489	725	327	225	363	357
<b>Fase 3</b>	206	272	229	443	404	880	211	121	392	100
<b>Producción Total</b>	552	788	586	1426	1378	2236	877	491	1058	1018

Es significativo mencionar que la adición de la mezcla de fango mixto con cascara de arroz con el transcurso de cada fase temporal, la producción de biogás va mejorando. Esto sugiere que la etapa de hidrólisis es lenta y poco a poco va optimizando el rendimiento. Esto es coherente con las investigaciones previas sobre pretratamientos previos para residuos sólidos (Gonçalves Liliana, 2013), aplicándose una hidrólisis previa mejoraría su asimilación.

Los residuos de la industria láctea (suero bruto y suero ácido) junto al lodo de depuradora, Ambos residuos tienen una producción de biogás similar en las fases del ensayo, poseen un comportamiento similar, siendo superior la producción de biogás en el suero bruto. En el caso del suero ácido, no afecta su acidez a los microorganismos presentes en el digestor debido a su buena alcalinidad, no variando durante el transcurso de los 63 días.

Dentro de los residuos procedentes de la fabricación de aceite de oliva, el residuo sólido (alperujo) junto con el fango mixto, tiene una producción de biogás mayor que la mezcla de fango mixto y alpechín (residuo líquido) debido a su alta carga orgánica.

En el caso la mezcla de fango mixto y alperujo, la adición de esta mezcla es muy viable, debido a su alta producción de biogás, siendo la más productiva de todas las mezclas de fango mixto y residuos orgánicos estudiadas en la co-digestión anaerobia.

En cuanto a la producción de biogás de la mezcla de fango mixto y alpechín, presenta un buen arranque manteniéndose estable durante las fases del ensayo, aumentando en las dos últimas.

Las aguas de glicerina junto al fango mixto, presentan una disminución en la producción de biogás en la tercera fase, siendo similar en las dos primeras. Por lo tanto, la mezcla de aguas glicerosas y fango mixto presentan una buena eficacia en la producción de biogás los primeros 42 días, pero muestra problemas de estabilidad en el proceso de co-digestión anaerobia.

El lixiviado es un residuo bastante complejo, ya que su composición varía según las características de los residuos sólidos urbanos. Se trata de un residuo de difícil tratamiento en una co-digestión anaerobia, ya que presenta una inestabilidad a lo largo de las tres fases.

El aceite usado presenta una disminución de la producción de biogás a lo largo de las tres fases, debido a la alta carga de grasas. Esto indica que el aceite tiene una buena respuesta



en los primeros días, 21, pero luego pierde eficacia en la producción de gas, pero sigue siendo una buena línea de gestión de residuos

#### **5.2.10. Conclusiones ensayo Co-digestión anaerobia**

La co-digestión anaerobia de residuos orgánicos junto al lodo de depuradora, es viable en la mayoría de los sustratos orgánicos estudiados, siendo inestable en el ensayo del aceite, aguas glicerosas y, el lixiviado que es bastante compleja su tratabilidad.

Los residuos de alta carga orgánica como el alperujo, suero bruto y suero ácido aumentan significativamente la producción de biogás. En el caso del alpechín no presenta un aumento significativo en el potencial metanogenico, pero al ser un residuo contaminante resulta beneficioso su tratamiento en co-digestión.

Es una buena herramienta tanto para la gestión de los residuos agroalimentarios, como para la mejora de obtención de biogás. Aun así, debe estudiarse previamente la viabilidad de cada uno de ellos en particular.

Los residuos industriales de alta carga orgánica, como las aguas de glicerina tienen comportamientos menos predecibles y el ensayo BMP previo es todavía más necesario. Las aguas de glicerina presentan problemas de estabilidad en el proceso de co-digestión

Los lixiviados de vertedero tienen un comportamiento inestable, depende mucho de su antigüedad en el vertedero, por lo que su ensayo es necesario.

Los residuos que presentan inestabilidad en el proceso se deben estudiar mezclados con otros co-sustratos que enmienden su comportamiento, en orden a aprovechar su co-digestión con fangos mixtos de EDAR, tal y como se refleja en el ensayo siguiente.

### **5.3. Ensayo de Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos**

Con el fin de determinar la viabilidad de la mezcla varios residuos orgánicos, en ensayos de digestión anaerobia y estudiar la producción de biogás y metano y, la biodegradabilidad. Se ha estudiado la complementariedad de los residuos, se han realizado test digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. En todos los casos se han utilizado las mismas condiciones experimentales.

- Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de cascara arroz y lixiviado
- Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de suero bruto y alperujo
- Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de alperujo y alpechín
- Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de aguas de glicerina y suero bruto
- Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de lixiviado y suero bruto
- Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de aceite usado de cocina y alperujo
- Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de aguas de glicerina y lixiviado

#### **Residuos**

En la tabla 130 del anexo III, se muestran los resultados de las analíticas de laboratorio llevadas a cabo con el fin de determinar las características de los residuos empleados en este trabajo. Con respecto a las analíticas, se ha seguido la metodología descrita en el apartado 4. Como se recoge en dicha tabla, los residuos utilizados poseen unas características significativamente diferentes puesto que existe cierta variabilidad entre los resultados analíticos obtenidos para cada uno de ellos.

#### **Inóculo**

Para realizar el ensayo BMP, se utilizó como fuente de biomasa metanogénica activa fango digerido extraído de los digestores de la EDAR que trata las aguas residuales urbanas de la comarca sur de Sevilla. Su composición se muestra en la tabla 131, anexo III.

Para las fases 2 y 3 se ha utilizado como inóculo fango adaptado procedentes de los ensayos BMP de las fase anterior. Las características analíticas se muestran en la tabla 132-133, anexo III.

### 5.3.1. Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de Cascara Arroz y Lixiviado

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de cascara arroz y lixiviado. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase1**, como se observa en la tabla 61, se observa que la cascara de arroz presenta una eliminación de DQO por encima del 30%. El porcentaje en eliminación de sólidos totales es de 27%. Sin embargo, el porcentaje de eliminación de sólidos volátiles, es superior, alcanzando un 49%. El pH no varía en los 21 días del ensayo. Cabe destacar la disminución del porcentaje de materia volátil a la salida del ensayo, llegando a un 56,79%.

Tabla 61. Ensayo Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

#### Cascara-Lixiviado

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	13.414,02 ±0,70	8.856,55 ±0,75	34
ST	mg L <sup>-1</sup>	11.070,06 ±0,82	8.065,00 ±0,85	27
Materia Seca	%	1,11	0,81	
SV	mg L <sup>-1</sup>	9.065,11 ±0,90	4.580,09 ±0,88	49
Materia Volátil	%	81,89	56,79	
pH		7,00 ±0,01	7,00 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	12,28 ±0,02	12,20 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	3.200,45 ±1,08	7.000,00 ±1,05	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	270,00 ±0,97	400,04 ±1,00	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	321,10 ±0,97	531,55 ±1,00	
Relación AGV/Alcalinidad		0,08 ±	0,06	

Como se muestra en la tabla 62, que corresponde con la **fase 2**, se observa que la cascara de arroz presenta una eliminación de materia orgánica por encima del 35%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es de 28%, y, el de sólidos volátiles es de 30%. Cabe destacar el incremento en la alcalinidad, llegando hasta un  $6.393,63 \pm 1,08 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ .<sup>1</sup> El pH no varía en los días del ensayo.

Tabla 62. Ensayo Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

#### Cascara-Lixiviado

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$15.687,01 \pm 0,73$	$9.876,02 \pm 0,74$	37
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$12.456,22 \pm 0,88$	$8.976,44 \pm 0,89$	28
Materia Seca	%	1,25	0,90	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$7.850,05 \pm 0,82$	$5.460,00 \pm 0,82$	30
Materia Volátil	%	63,02	60,83	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,00 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,28 \pm 0,02$	$12,20 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.200,85 \pm 1,09$	$6.393,63 \pm 1,08$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$265,52 \pm 0,92$	$382,50 \pm 0,99$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$318,62 \pm 0,92$	$508,14 \pm 0,99$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,08	0,06	

En la **fase 3** (tabla 63), se observa que la cascara de arroz presenta una eliminación de DQO es del 44%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es de 29%, y, el de sólidos volátiles presenta una eliminación de 32%. Cabe destacar el incremento en la alcalinidad, llegando hasta  $6.400,63 \pm 1,01 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ .

Tabla 63. Ensayo Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

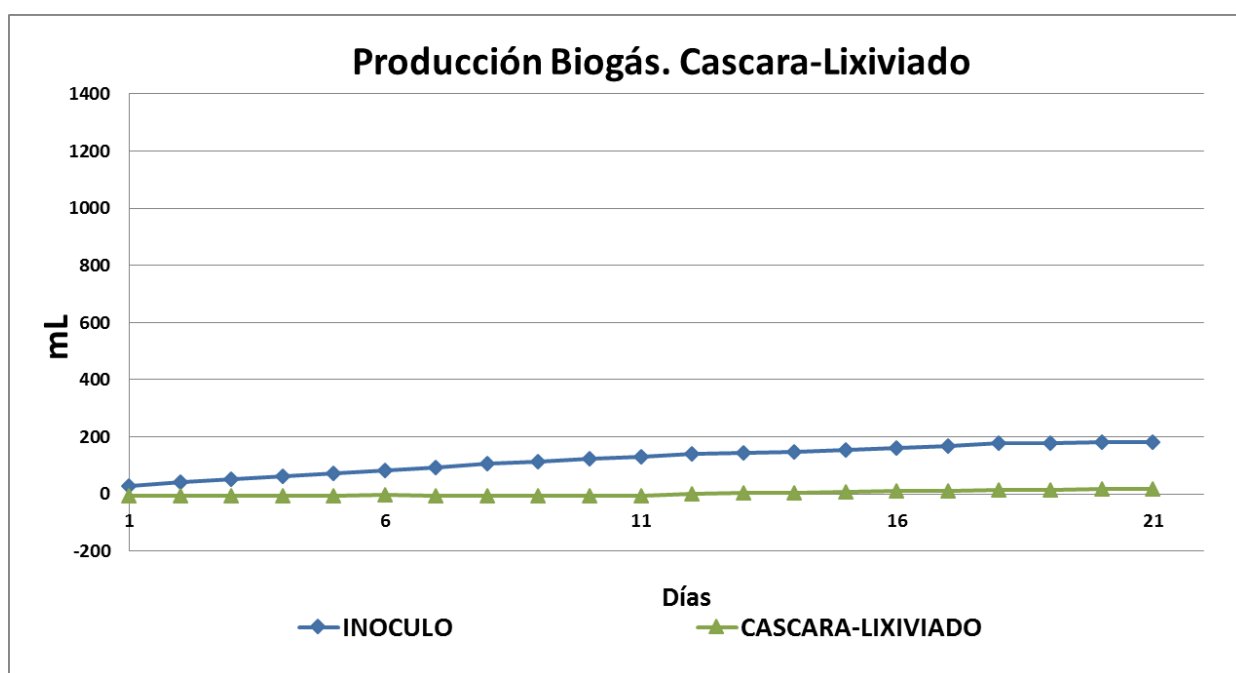
#### Cascara-Lixiviado

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$15.684,40 \pm 0,70$	$8.795,50 \pm 0,71$	44
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$13.750,02 \pm 0,85$	$9.756,71 \pm 0,86$	29
Materia Seca	%	1,38	0,98	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$8.042,82 \pm 0,80$	$5.460,93 \pm 0,90$	32
Materia Volátil	%	58,49	55,97	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,00 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,28 \pm 0,02$	$12,20 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.300,25 \pm 1,00$	$6.400,63 \pm 1,01$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$370,32 \pm 0,94$	$390,78 \pm 1,03$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$420,48 \pm 0,94$	$510,00 \pm 1,03$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,11	0,06	

### 5.3.1.1. Producción de Biogás

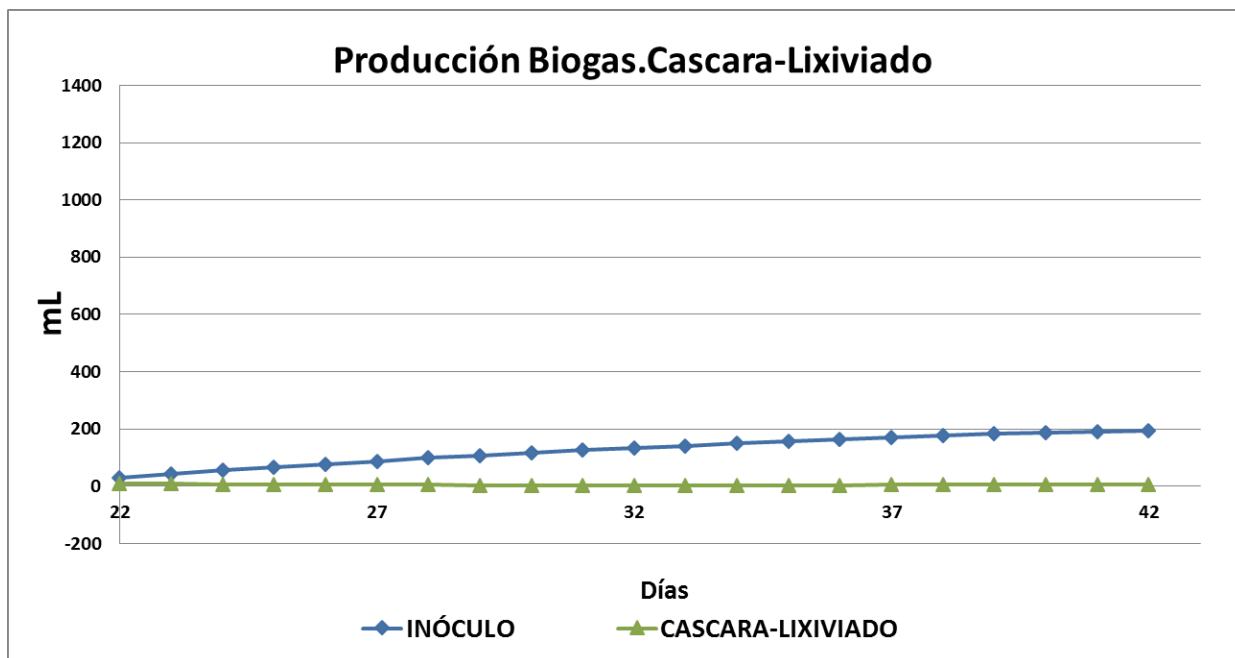
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de cascara arroz y lixiviado. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de la mezcla de cascara arroz y lixiviado.

La producción de biogás de la **fase 1** como se representa en la gráfica 111, la adición de la mezcla cascara arroz y lixiviado no aumenta la producción de biogás. El inóculo produce 163 mL de biogás más que la mezcla de cascara de arroz y lixiviado que tan solo produce 19 mL.



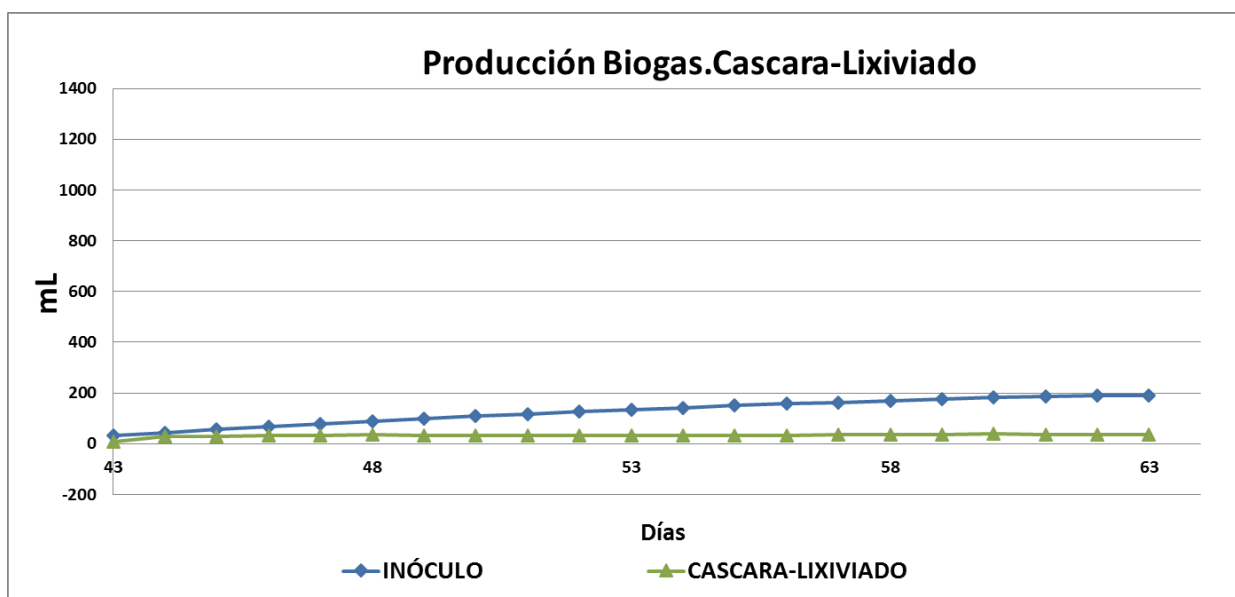
Gráfica 111. Producción de Biogás Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

En la **fase 2** como se representa en la gráfica 112, la adición de la mezcla cascara arroz y lixiviado no aumenta la producción de biogás. El inóculo (193mL) produce 188 mL de biogás más que la mezcla de cascara de arroz y lixiviado que tan solo produce 5mL



Gráfica 112. Producción de Biogás Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase2

Como se representa en la gráfica 113 que corresponde con la **fase 3**, la adición de la mezcla cascara arroz y lixiviado no aumenta la producción de biogás. El inóculo produce 156 mL de biogás más que la mezcla de cascara de arroz y lixiviado que tan solo produce 36 mL.

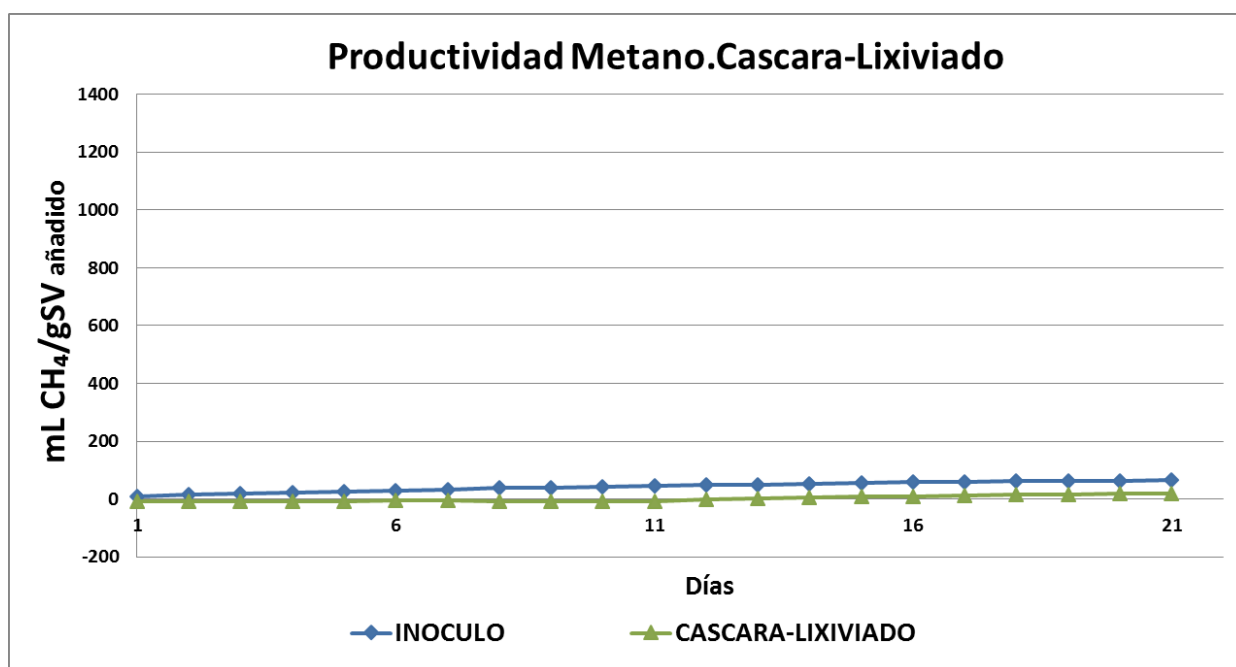


Gráfica 113. Producción de Biogás Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

### 5.3.1.2. Productividad de Metano

En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de cascara arroz y lixiviado, de las distintas fases temporales.

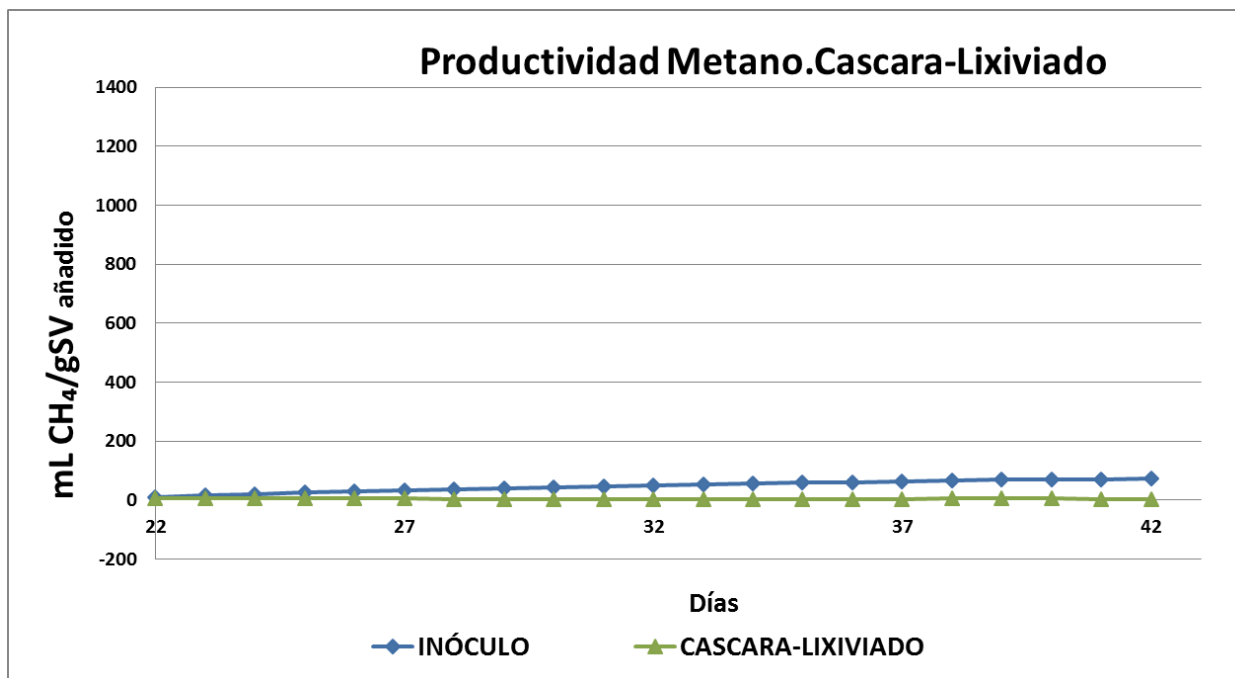
Con respecto a la productividad de metano en la **fase 1**, el inóculo produce un total de 65 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> y el ensayo de la mezcla de la cascara de arroz y lixiviado 19 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, tal y como se observa en la gráfica 114.



Gráfica 114. Productividad Metano Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

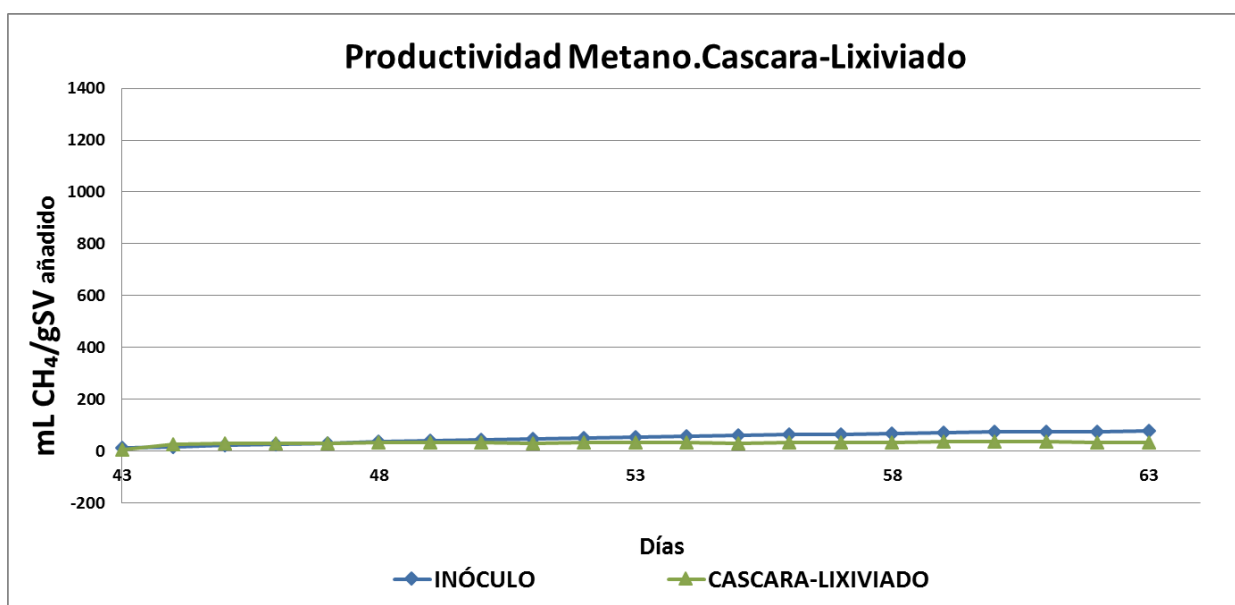
La productividad de metano en la **fase 2**, corresponde con la gráfica 115, el inóculo produce un total de 72 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> y el ensayo de la mezcla de la cascara de arroz y lixiviado tan solo 5 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.





Gráfica 115. Productividad Metano Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

Con respecto a la productividad de metano de la **fase 3**, del día 43 al 50, la mezcla de residuos presenta una productividad similar al inóculo, pero a partir del día 50, tiene una productividad inferior. El inóculo produce un total de 78 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> y el ensayo de la mezcla de la cascara de arroz y lixiviado 35 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>. Como se observa en la gráfica 116.



Gráfica 116. Productividad Metano Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

#### **5.3.1.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es similar en todas las fases.

El porcentaje de metano en la primera fase del ensayo de la mezcla de cáscara de arroz y lixiviado es del 68%, aumentando en un 13% con respecto al ensayo del inóculo (55%). En la segunda fase disminuye hasta un 65% y, en la última fase del ensayo el porcentaje de metano es del 68%, aumentando en un 13% con respecto al ensayo del inóculo (55%).

A la vista de los resultados, la adición de la mezcla de la cascara de arroz y lixiviado en una digestión anaerobia no ha conducido a un incremento en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al inóculo debido a que son residuos de difícil tratamiento.

### 5.3.2. Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos de Suero Bruto y Alperujo

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de suero bruto y alperujo. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1**, se observa que el ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de suero bruto y alperujo presenta una eliminación de materia orgánica del 70%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es de 32%. Sin embargo los sólidos volátiles presentan un porcentaje de eliminación superior, alcanzando el 49%. La relación AGV/ Alcalinidad, disminuye de un 0,40 a un 0,10. El porcentaje de materia volátil a la salida del ensayo, disminuye hasta 55,95%. Como se muestra en la tabla 64.

Tabla 64. Ensayo SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

#### Suero Bruto-Alperujo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	25.192,02 ±0,76	7.586,11 ±0,79	70
ST	mg L <sup>-1</sup>	16.870,40 ±0,84	11.420,00 ±0,90	32
Materia Seca	%	1,69	1,14	
SV	mg L <sup>-1</sup>	12.480,65 ±0,86	6.390,02 ±0,80	49
Materia Volátil	%	73,98	55,95	
pH		7,00 ±0,01	7,10 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	17,57 ±0,02	17,50 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	2.000,11 ±1,09	7.120,90 ±1,04	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	800,44 ±1,03	700,14 ±0,94	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	961,00 ±1,03	735,36 ±0,94	
Relación AGV/Alcalinidad		0,40	0,10	

La tabla 65, que corresponde con la **fase 2** del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de suero bruto y alperujo, presenta una eliminación de materia orgánica del 60%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es de 25%. Sin embargo los sólidos volátiles presentan un porcentaje de eliminación superior, alcanzando el 43%. La relación AGV/Alcalinidad, disminuye de un 0,39 a un 0,08. El porcentaje de materia volátil a la salida del ensayo, disminuye hasta 56,60%.

Tabla 65. Ensayo SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

#### Suero Bruto-Alperujo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	25.789,11 ±0,77	10.245,00 ±0,80	60
ST	mg L <sup>-1</sup>	16.450,20 ±0,82	12.345,60 ±0,85	25
Materia Seca	%	1,65	1,23	
SV	mg L <sup>-1</sup>	12.234,12 ±0,83	6.987,20 ±0,84	43
Materia Volátil	%	74,37	56,60	
pH		7,00 ±0,01	7,10 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	17,57 ±0,02	17,50 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	2.000,11 ±1,05	7.000,33 ±1,00	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	775,86 ±0,97	568,97 ±0,99	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	931,03 ±0,97	682,76 ±0,99	
Relación AGV/Alcalinidad		0,39	0,08	

En la **fase 3** como se muestra en la tabla 66, la mezcla del suero bruto y el alperujo presenta una eliminación de materia orgánica del 55%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es de 33%. Sin embargo los sólidos volátiles presentan un porcentaje de eliminación superior, alcanzando el 38%. La relación AGV/ Alcalinidad, disminuye de un 0,39 a un 0,08.

Tabla 66. Ensayo SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

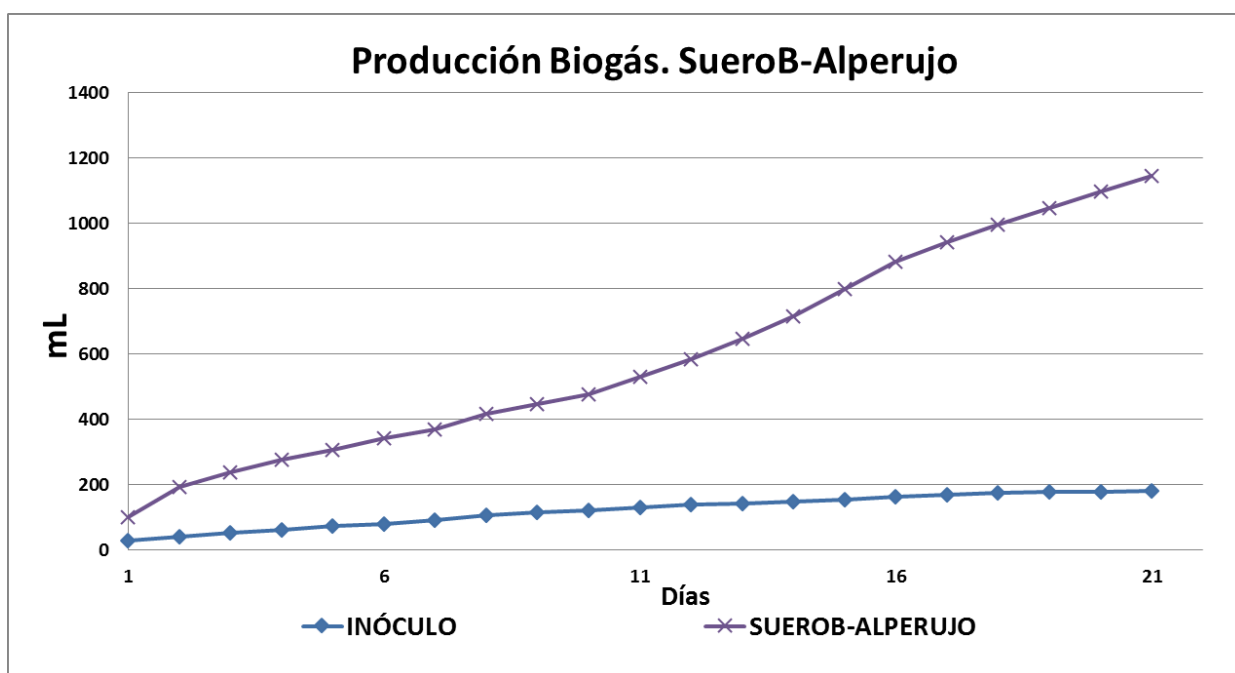
#### Suero Bruto-Alperujo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	25.450,21 ±0,78	11.450,88 ±0,75	55
ST	mg L <sup>-1</sup>	15.987,36 ±0,85	10.756,77 ±0,90	33
Materia Seca	%	1,60	1,08	
SV	mg L <sup>-1</sup>	11.240,14 ±0,81	6.987,96 ±0,85	38
Materia Volátil	%	70,31	64,96	
pH		7,00 ±0,01	7,10 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	17,57 ±0,02	17,50 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	2.000,74 ±1,06	7.100,85 ±1,06	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	780,20 ±1,04	570,11 ±1,00	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	938,03 ±1,04	685,00 ±1,00	
Relación AGV/Alcalinidad		0,39	0,08	

### 5.3.2.1. Producción de Biogás

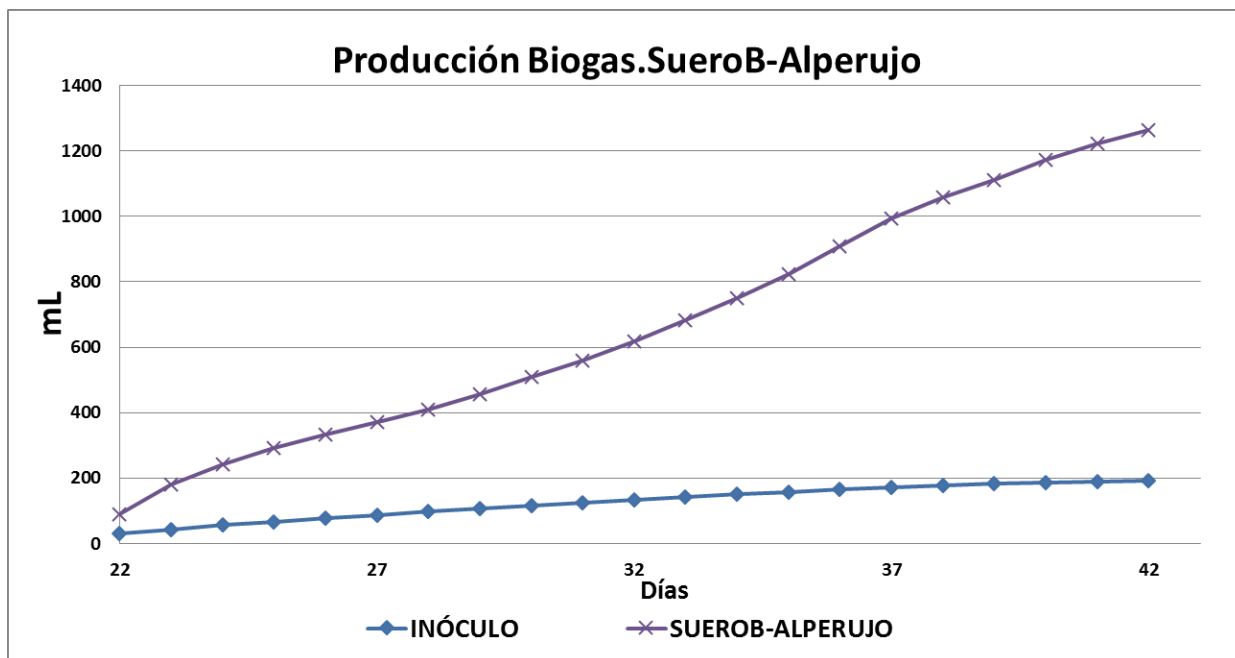
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de suero bruto y alperujo. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de la mezcla de suero bruto y alperujo.

En la **fase 1**, la producción de biogás, presenta un crecimiento exponencial, no presentando estabilización. La producción total de biogás de la mezcla SueroB-Alperujo es de 1.147 mL. Con respecto al inóculo (182 mL), la mezcla de residuos incrementa significativamente la producción de biogás en 965 mL, tal y como se puede observar en la gráfica 117.



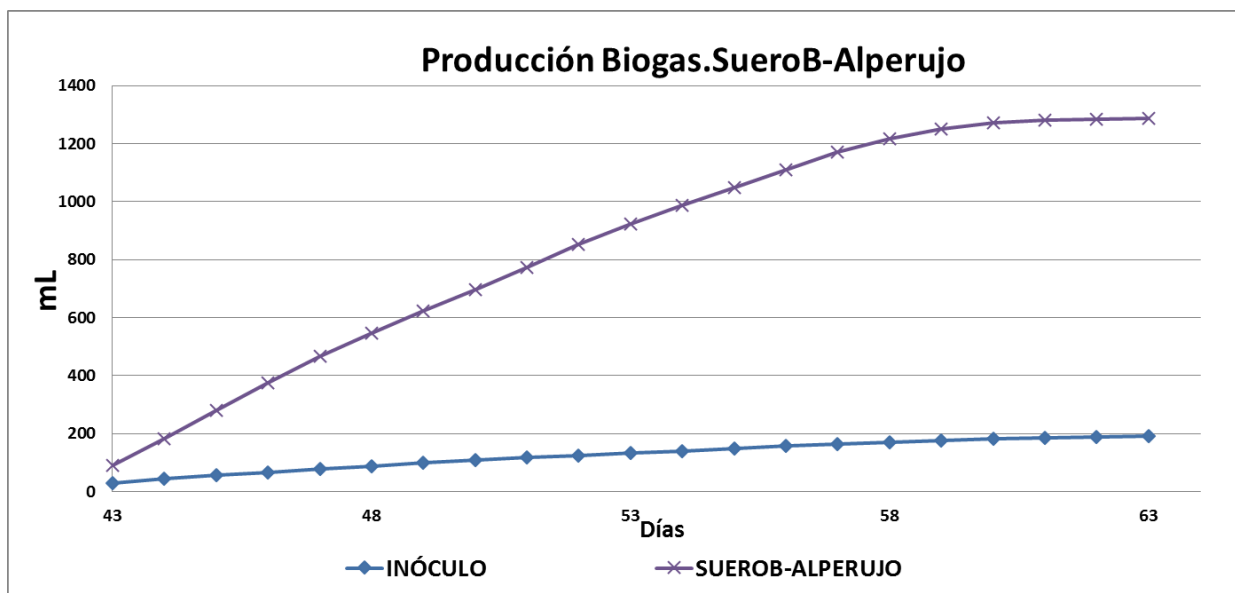
Gráfica 117. Producción de Biogás SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

La producción de biogás en la **fase 2**, presenta un crecimiento exponencial, no presentando estabilización. La producción total de biogás de la mezcla SueroB-Alperujo es de 1.265 mL. Con respecto al inóculo (193 mL), la mezcla de residuos incrementa la producción de biogás en 1.072 mL, tal y como se puede observar en la gráfica 118.



Gráfica 118. Producción de Biogás SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

Como se observa en la gráfica 119 que corresponde con la **fase 3** del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de suero bruto y alperujo. La producción de biogás, presenta un crecimiento exponencial, no presentando estabilización. La producción total de biogás de la mezcla SueroB-Alperujo es de 1.288 mL. Con respecto al inóculo (191 mL), la mezcla de residuos incrementa la producción de biogás en 1.097 mL.

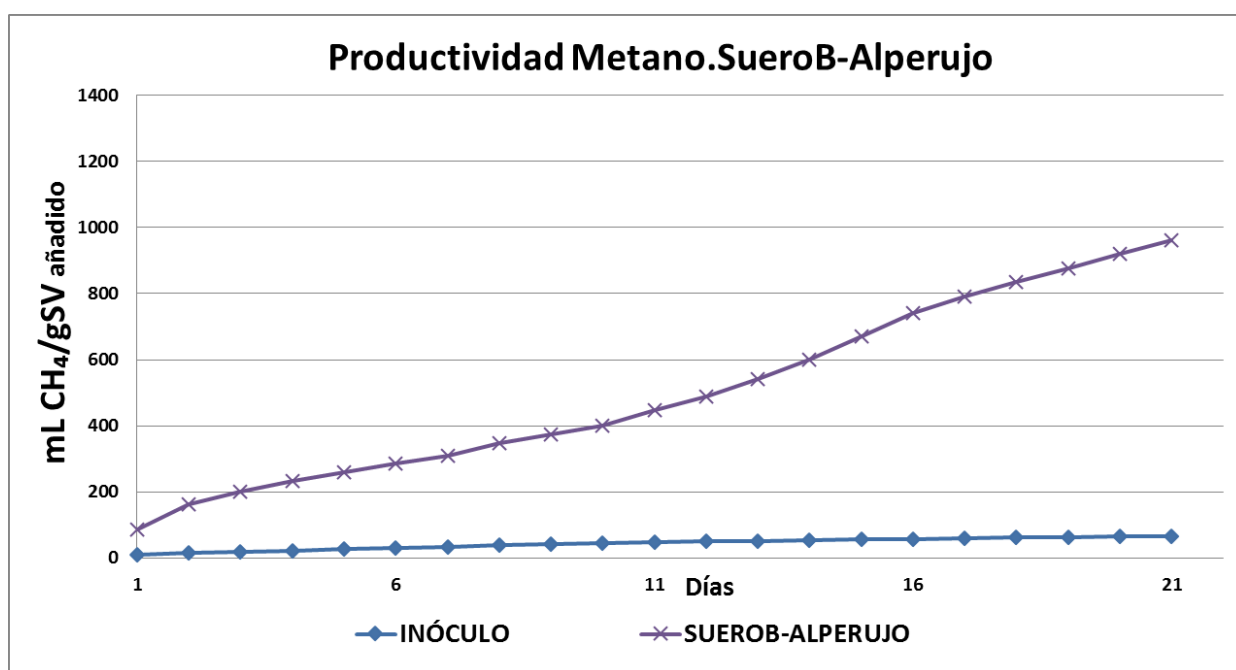


Gráfica 119. Producción de Biogás SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

### 5.3.2.2. Productividad de Metano

En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de suero bruto y alperujo, de las distintas fases temporales.

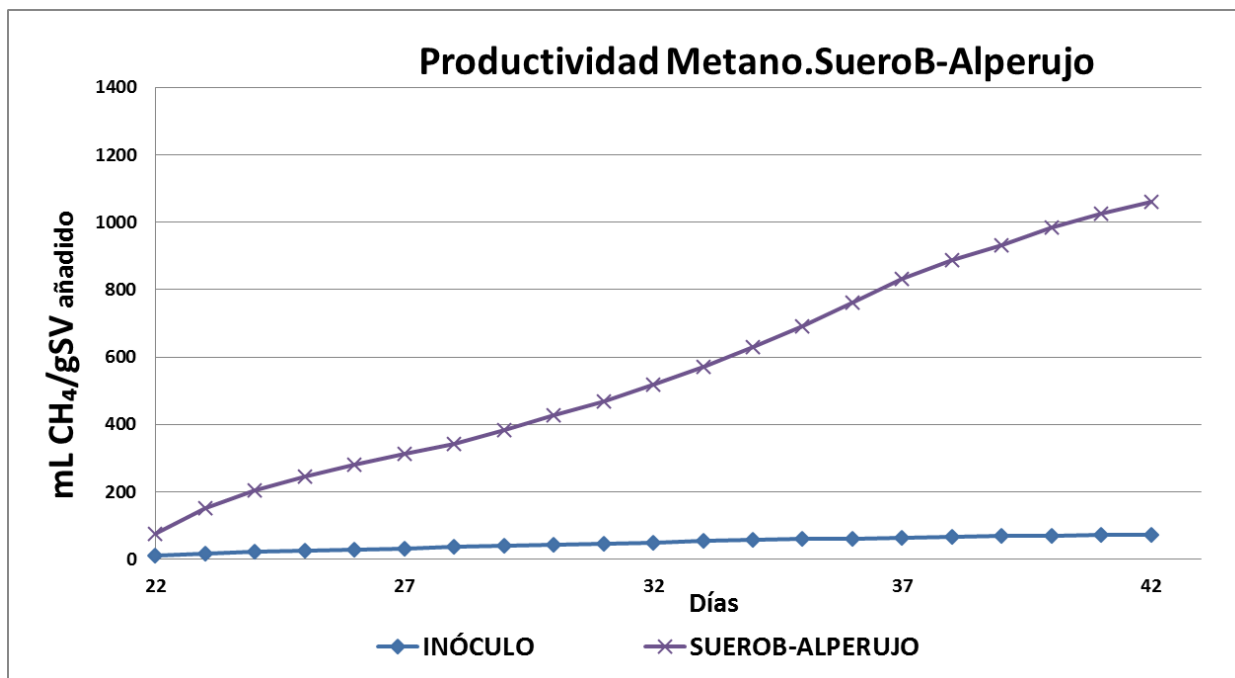
Como se observa en la gráfica 120, respecto a la **fase 1**. La productividad de metano en el SueroB-Alperujo es de 961 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, significativamente superior a la del inóculo (65 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).



Gráfica 120. Productividad de Metano SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

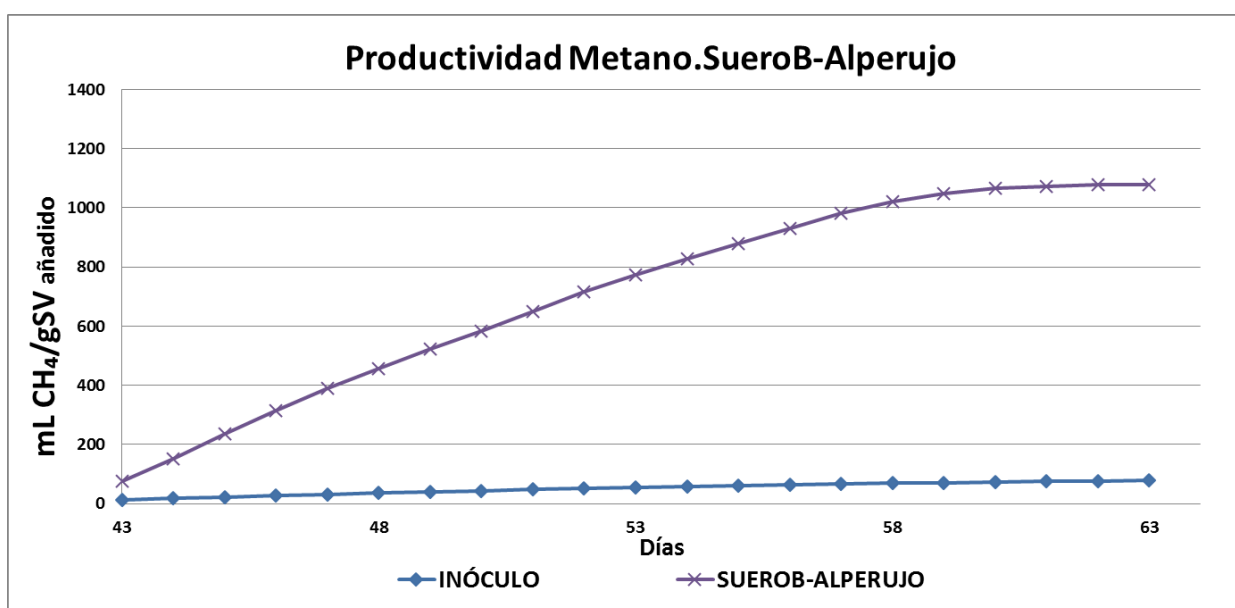
Como se observa en la gráfica 121 que se corresponde con la **fase 2** del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de suero bruto y alperujo. La productividad de metano en el SueroB-Alperujo es de 1.060 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, significativamente superior a la del inóculo (72 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).





Gráfica 121. Productividad de Metano SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

En la **fase 3**, como se observa en la gráfica 122. La productividad de metano en el ensayo de la mezcla de SueroB-Alperujo es de 1.080 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, superior a la del inóculo, que tan solo tiene una productividad de 78 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 122. Productividad de Metano SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

#### **5.3.2.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. El porcentaje de metano en el ensayo con SueroB-Alperujo es del 75%, aumentando en un 20% con respecto al ensayo del inóculo (55%).

A la vista de los resultados, la adición de la mezcla de suero bruto y alperujo en una digestión anaerobia ha conducido a un incremento significativo en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al inóculo.

### 5.3.3. Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos de Alperujo y Alpechín

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de alperujo y alpechín. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

Los resultados analíticos de la **fase 1** del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de alperujo y alpechín (tabla 67), se puede observar que el porcentaje de eliminación de materia orgánica en el caso de la mezcla Alperujo-Alpechín es del 69%. La eliminación de los sólidos totales es de un 42%. Sin embargo, en los sólidos volátiles es superior, llegando a un 55%. El pH final es de  $7,50 \pm 0,01$  y, la relación AGV/ Alcalinidad es 0,08. Cabe destacar, que la alcalinidad aumenta en los días que transcurre el ensayo hasta un  $6.400,09 \pm 1,05 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ .

Tabla 67. Ensayo Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

#### Alperujo-Alpechín

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$24.073,03 \pm 0,70$	$7.369,63 \pm 0,72$	69
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$16.365,22 \pm 0,81$	$9.460,00 \pm 0,85$	42
Materia Seca	%	1,64	0,95	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$11.680,01 \pm 0,90$	$5.220,50 \pm 0,88$	55
Materia Volátil	%	71,37	55,18	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,50 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,00 \pm 0,02$	$12,10 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$2.400,65 \pm 1,04$	$6.400,09 \pm 1,05$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$850,00 \pm 0,95$	$540,55 \pm 1,02$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$1.020,10 \pm 0,95$	$640,50 \pm 1,02$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,35	0,08	

En la **fase 2**, se puede observar que el porcentaje de eliminación de DQO en el caso de la mezcla Alperujo-Alpechín es del 54%. La eliminación de los sólidos totales es de un 35%. Sin embargo, en los sólidos volátiles es superior, llegando a un 53%. El pH final es de  $7,50 \pm 0,01$  y, la relación AGV/ Alcalinidad es 0,09. Cabe destacar, que la alcalinidad aumenta en los días que transcurre el ensayo hasta un  $6.415,20 \pm 1,00 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . Tal y como se muestra en la tabla 68.

Tabla 68. Ensayo Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

#### Alperujo-Alpechín

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$24.785,22 \pm 0,73$	$11.450,20 \pm 0,74$	54
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$16.984,65 \pm 0,88$	$10.976,00 \pm 0,89$	35
Materia Seca	%	1,70	1,10	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$12.000,41 \pm 0,90$	$5.640,65 \pm 0,88$	53
Materia Volátil	%	70,65	51,38	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,50 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,00 \pm 0,02$	$12,10 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$2.380,41 \pm 1,05$	$6.416,20 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$844,83 \pm 0,90$	$545,69 \pm 1,02$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$1.013,79 \pm 0,90$	$645,83 \pm 1,02$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,35	0,09	

En la tabla 69 que corresponde con la **fase 3** del ensayo, se puede observar que el porcentaje de eliminación de DQO en el caso de la mezcla Alperujo-Alpechín es del 56%. La eliminación de los sólidos totales es de un 35%. Sin embargo, en los sólidos volátiles es un poco superior, llegando a un 39%. El pH final es de  $7,50 \pm 0,01$  y, la relación AGV/Alcalinidad es de 0,08. Cabe destacar, que la alcalinidad aumenta en los días que transcurre el ensayo hasta un  $6.900,89 \pm 1,05 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ .

Tabla 69. Ensayo Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

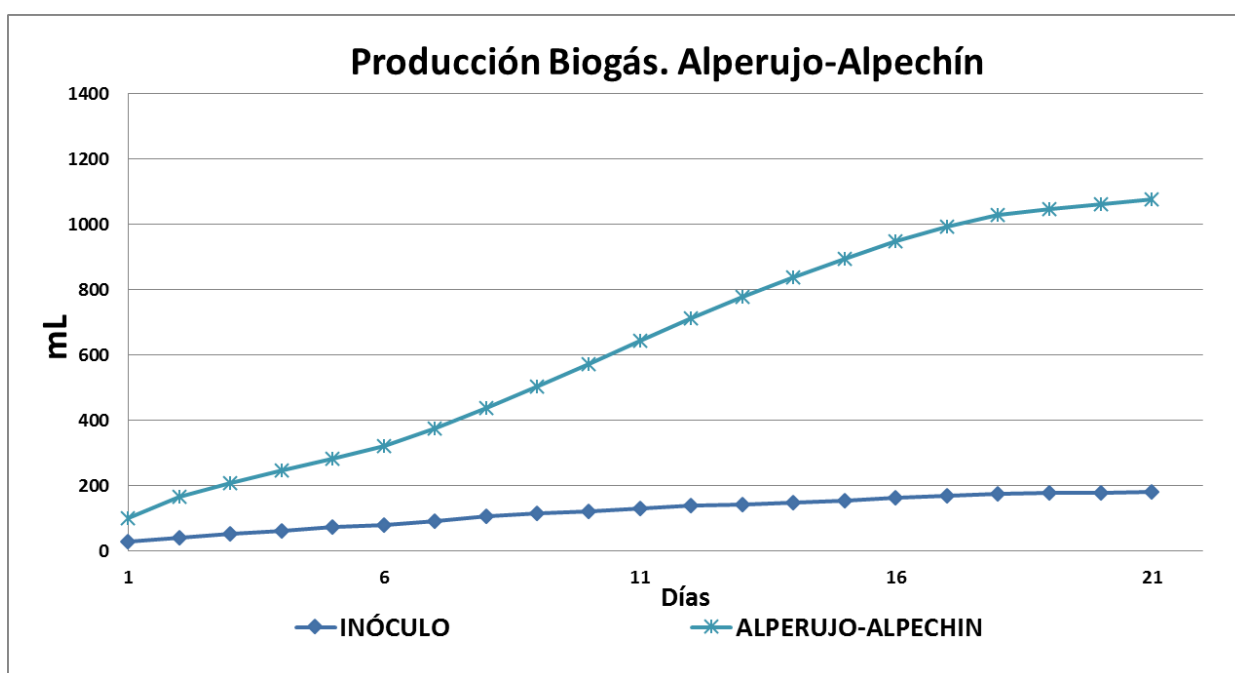
#### Alperujo-Alpechín

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$24.357,10 \pm 0,70$	$10.780,35 \pm 0,70$	56
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$16.042,28 \pm 0,81$	$10.360,46 \pm 0,82$	35
Materia Seca	%	1,60	1,04	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$11.879,58 \pm 0,90$	$7.200,64 \pm 0,89$	39
Materia Volátil	%	74,05	69,50	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,50 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,00 \pm 0,02$	$12,10 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$2.400,71 \pm 1,07$	$6.900,89 \pm 1,05$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$850,02 \pm 0,97$	$550,18 \pm 0,99$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$1.012,26 \pm 0,97$	$650,77 \pm 0,99$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,35	0,08	

### 5.3.3.1. Producción de Biogás

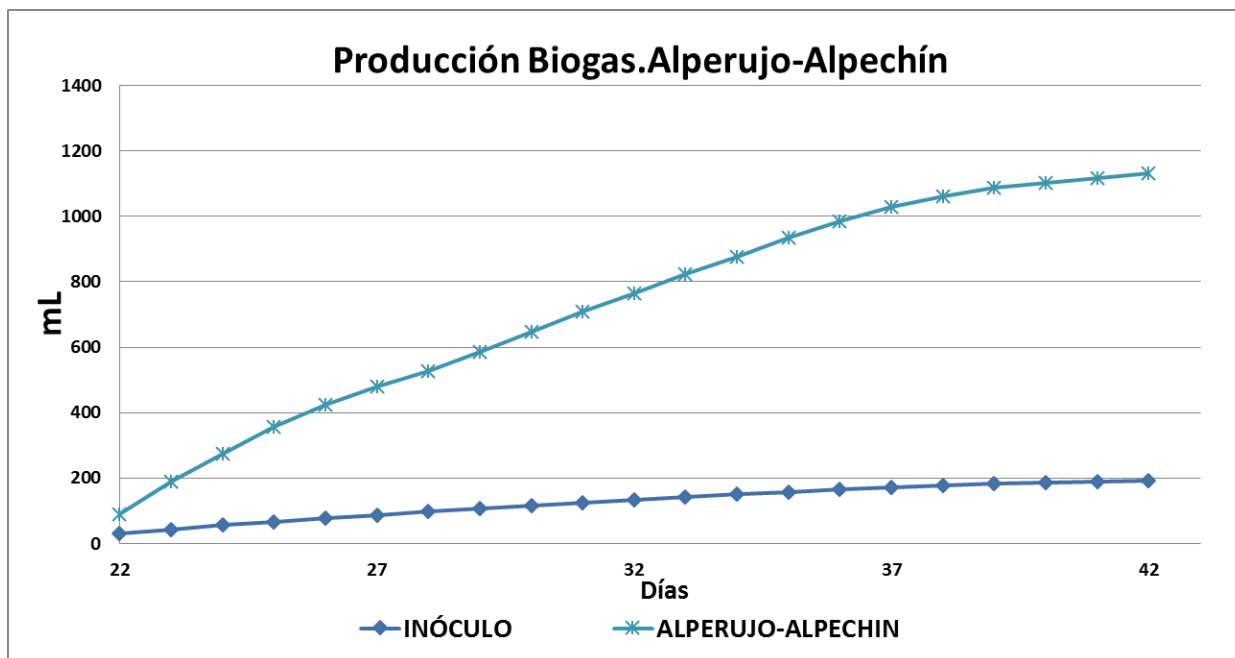
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de alperujo y alpechín. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de la mezcla de alperujo y alpechín.

En la **fase1**, tal y como se representa en la gráfica 123. La adición de la mezcla de Alperujo-Alpechín, incrementa de manera significativa la producción de biogás. Se produce un crecimiento hasta el día 7, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, generándose un volumen total de 1.078 mL.



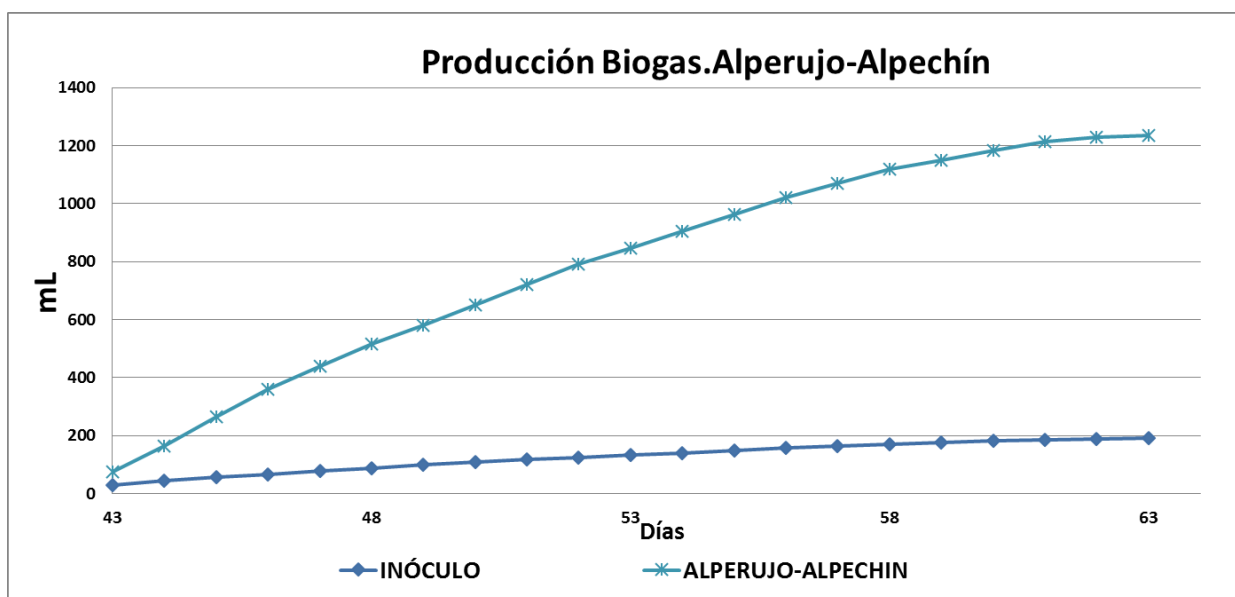
Gráfica 123. Producción Biogás Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

Como se representa en la gráfica 124, que corresponde con la **fase 2** del ensayo. La adición de la mezcla de Alperujo-Alpechín, incrementa de manera significativa la producción de biogás. Se produce un crecimiento hasta el día 37, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, generándose un volumen total de 1.130 mL



Gráfica 124. Producción Biogás Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

En la **fase 3**, la adición de la mezcla de Alperujo-Alpechín, incrementa de manera significativa la producción de biogás. Se produce un crecimiento hasta el día 58, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, generándose un volumen total de 1.237 mL. Tal y como se representa en la gráfica 125.

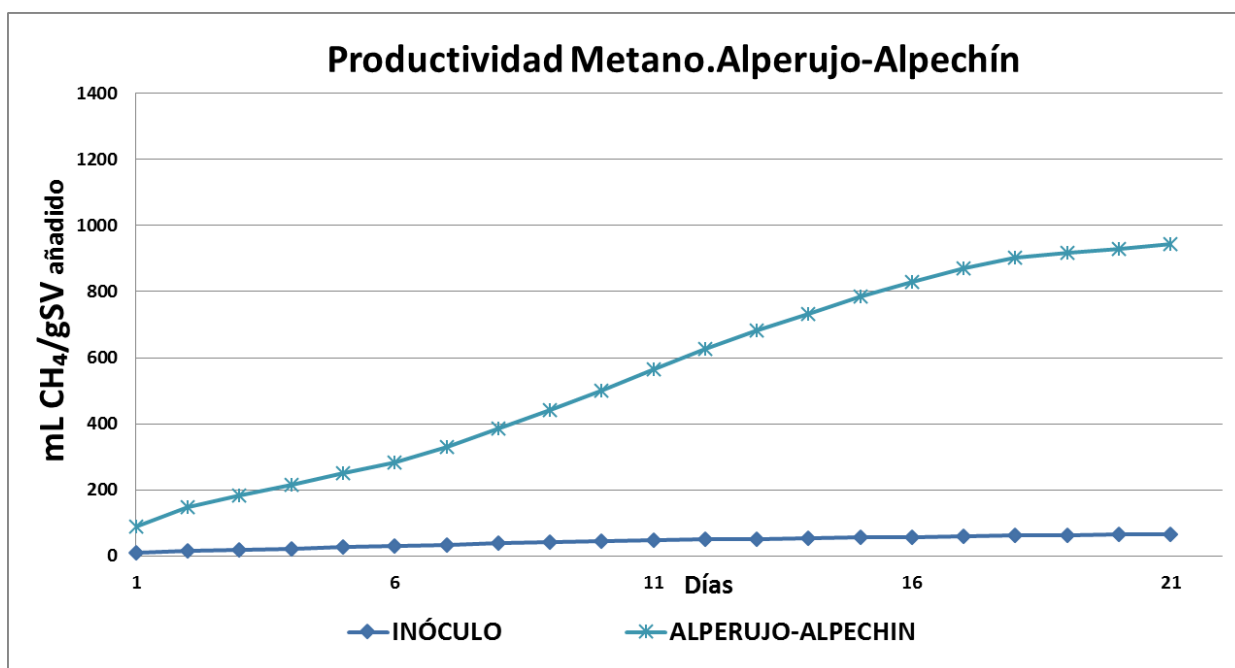


Gráfica 125. Producción Biogás Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

### 5.3.3.2. Productividad de Metano

En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de alperujo y alpechín, de las distintas fases temporales.

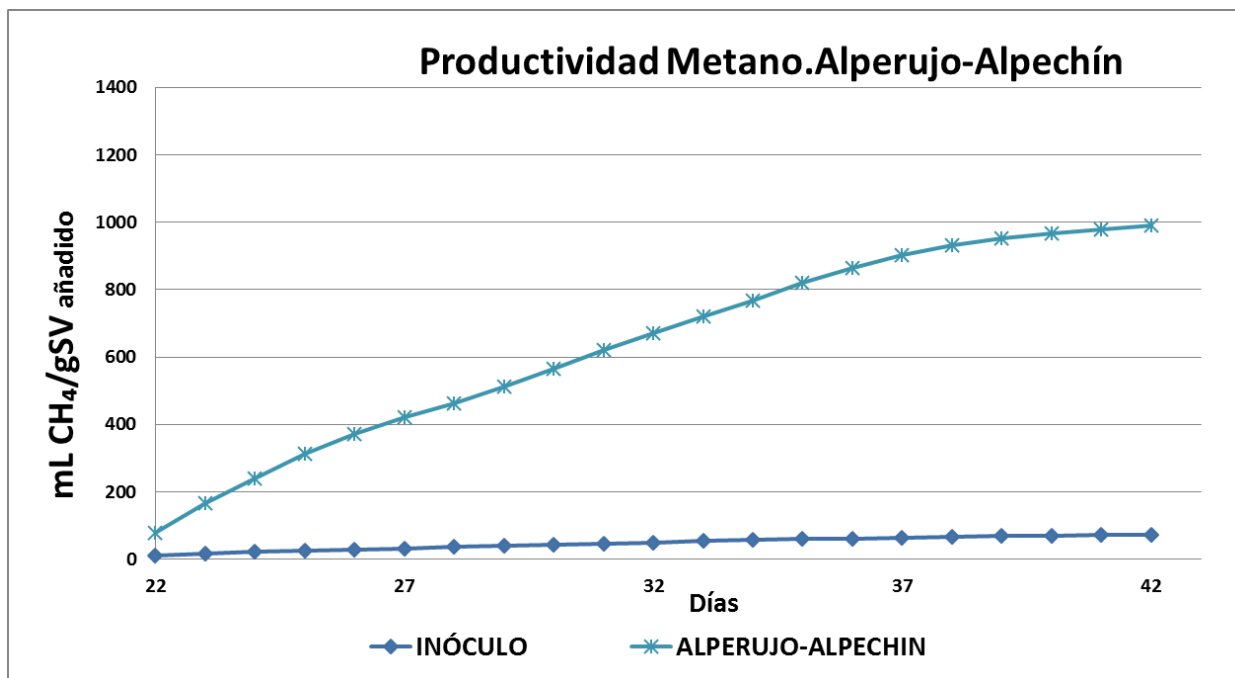
En la **fase 1**, la productividad de metano en la mezcla de Alperujo-Alpechín ( $944 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ ), como se puede observar en la gráfica 126, es superior a la del inóculo ( $65 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ ).



Gráfica 126. Productividad Metano Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

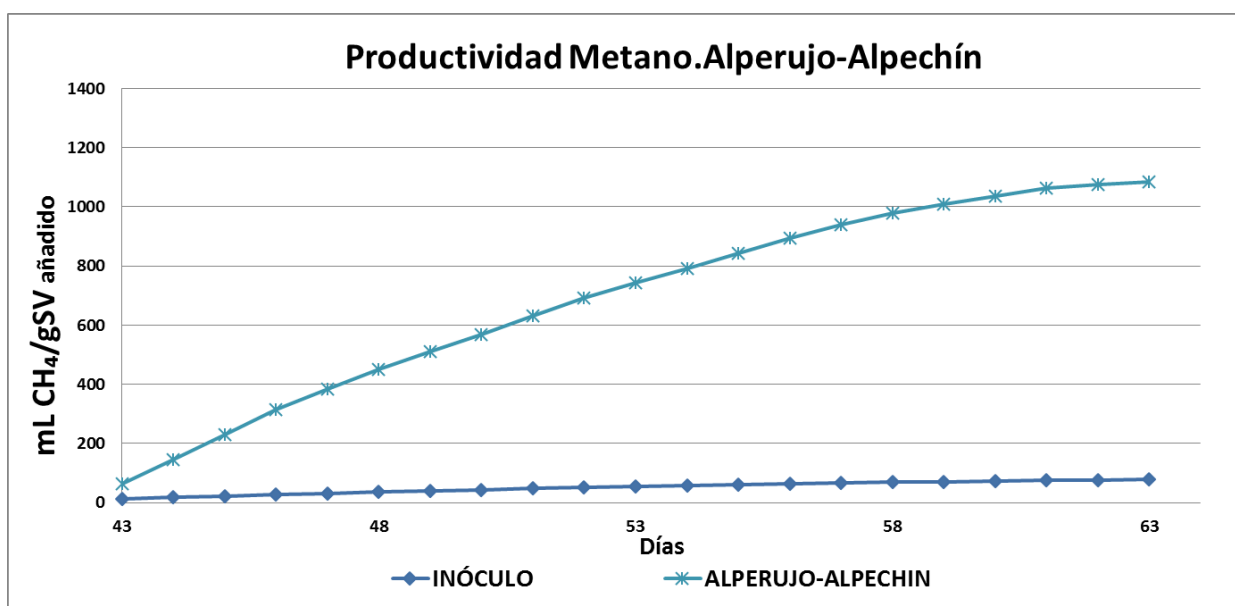
Tal y como se observa en la gráfica 127, respecto a la **fase 2**. La productividad de metano en la mezcla de Alperujo-Alpechín ( $990 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ ), es significativamente superior a la del inóculo ( $70 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ ).





Gráfica 127. Productividad Metano Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

En la **fase 3**, la productividad de metano del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de Alperujo-Alpechín es de 1.083 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>. Como se puede observar en la gráfica 128, es superior a la del inóculo (78 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).



Gráfica 128. Productividad Metano Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

#### **5.3.3.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. El porcentaje de metano en el ensayo con la mezcla Alperujo-Alpechín es del 75%, aumentando en un 20% con respecto al ensayo del inóculo (55%).

A la vista de los resultados, la adición de la mezcla de alperujo y alpechín en una digestión anaerobia ha conducido a un incremento en la producción de biogás y en la productividad de metano.

### 5.3.4. Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos de Aguas de Glicerina y Suero Bruto

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de glicerina y suero bruto. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

Como se observa en la tabla 70, respecto a la **fase 1**. La mezcla del suero bruto con el residuo de la fabricación de biodiesel presenta una eliminación de DQO del 67%, Con respecto a los sólidos, el porcentaje de eliminación de los sólidos volátiles es de un 35%. Sin embargo, en porcentaje de eliminación en los sólidos totales, disminuye hasta un 23%. La alcalinidad presenta un incremento durante los días del ensayo, llegando a 6.300,19  $\pm 1,03$  mg  $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ .

Tabla 70. Ensayo Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

#### Glicerina-Suero Bruto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg $\text{L}^{-1}$	22.130,22 $\pm 0,76$	7.369,02 $\pm 0,71$	67
ST	mg $\text{L}^{-1}$	15.360,11 $\pm 0,82$	11.880,00 $\pm 0,88$	23
Materia Seca	%	1,54	1,19	
SV	mg $\text{L}^{-1}$	10.090,00 $\pm 0,84$	6.580,00 $\pm 0,90$	35
Materia Volátil	%	65,69	55,39	
pH		7,00 $\pm 0,01$	7,40 $\pm 0,01$	
Conductividad	mS $\text{cm}^{-1}$	12,05 $\pm 0,02$	12,00 $\pm 0,02$	
Alcalinidad	mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	1.300,56 $\pm 1,05$	6.300,19 $\pm 1,03$	
AGV	mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	520,30 $\pm 0,99$	680,00 $\pm 1,04$	
AGV	mg $\text{CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	622,11 $\pm 0,99$	812,50 $\pm 1,04$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,40	0,11	

En la **fase 2** como se observa en la tabla 71, se recogen los resultados de los análisis del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de glicerina y suero bruto, presenta una eliminación de materia orgánica del 45%, Con respecto a los sólidos, el porcentaje de eliminación de los sólidos volátiles es de un 40%. Sin embargo, en porcentaje de eliminación en los sólidos totales, disminuye hasta un 24%. La alcalinidad presenta un incremento durante los días del ensayo, llegando a  $6.296,71 \pm 1,02 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . La relación AGV/Alcalinidad disminuye, de un 0,40 hasta un 0,12.

Tabla 71. Ensayo Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

#### Glicerina-Suero Bruto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$23.104,11 \pm 0,76$	$12.780,36 \pm 0,77$	45
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$15.780,02 \pm 0,88$	$11.980,41 \pm 0,90$	24
Materia Seca	%	1,58	1,20	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$10.745,00 \pm 0,80$	$6.490,54 \pm 0,81$	40
Materia Volátil	%	68,09	54,17	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,40 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,05 \pm 0,02$	$12,00 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$1.300,65 \pm 1,00$	$6.296,71 \pm 1,02$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$517,24 \pm 1,04$	$775,86 \pm 0,97$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$620,69 \pm 1,04$	$931,00 \pm 0,97$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,40	0,12	

En la **fase 3**, la mezcla del suero bruto con el residuo de la fabricación de biodiesel presenta una eliminación de DQO del 41%, Con respecto a los sólidos, el porcentaje de eliminación de los sólidos volátiles es de un 39%. Sin embargo, en porcentaje de eliminación en los sólidos totales, disminuye hasta un 30%. La alcalinidad presenta un incremento durante los días del ensayo, llegando a  $6.680,36 \pm 1,00 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . El pH aumenta durante los días del ensayo, hasta un  $7,40 \pm 0,01$ . Tal y como se observa en la tabla 72.

Tabla 72. Ensayo Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

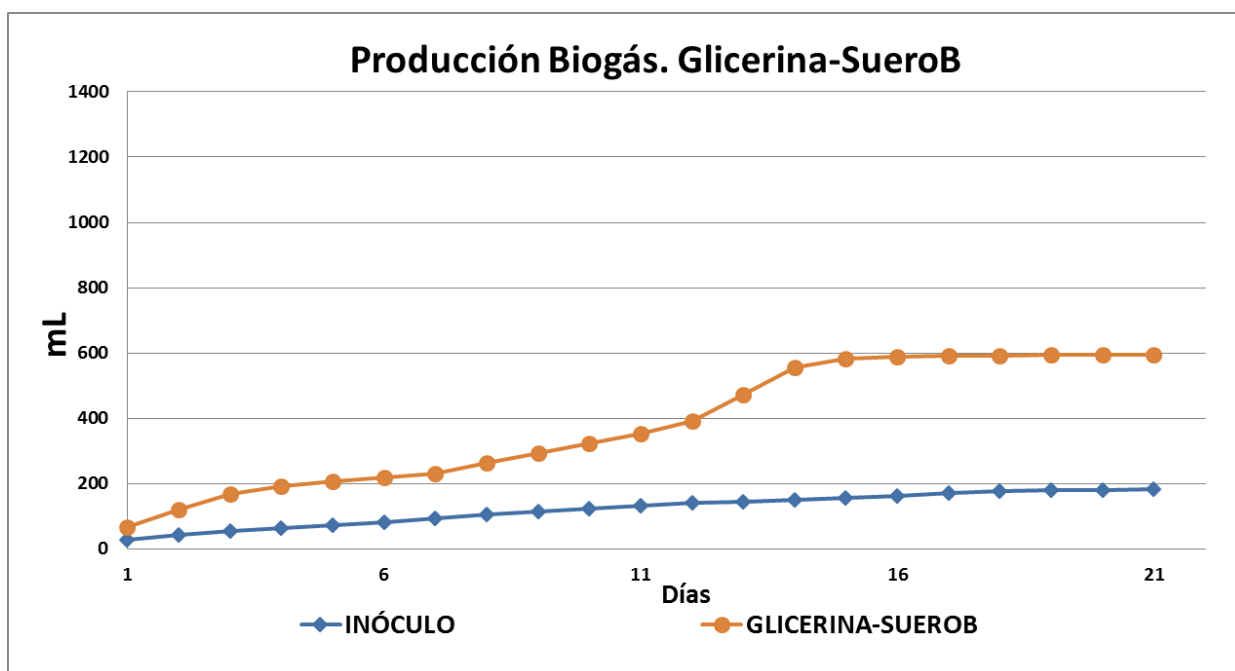
#### Glicerina-Suero Bruto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$22.985,11 \pm 0,78$	$13.650,66 \pm 0,70$	41
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$16.020,84 \pm 0,90$	$11.210,45 \pm 0,84$	30
Materia Seca	%	1,60	1,12	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$10.570,38 \pm 0,90$	$6.450,21 \pm 0,85$	39
Materia Volátil	%	65,98	57,54	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,40 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,05 \pm 0,02$	$12,00 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$1.400,14 \pm 1,03$	$6.680,36 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$520,75 \pm 0,95$	$780,05 \pm 1,02$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$621,00 \pm 0,95$	$935,00 \pm 1,02$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,37	0,12	

#### 5.3.4.1. Producción de Biogás

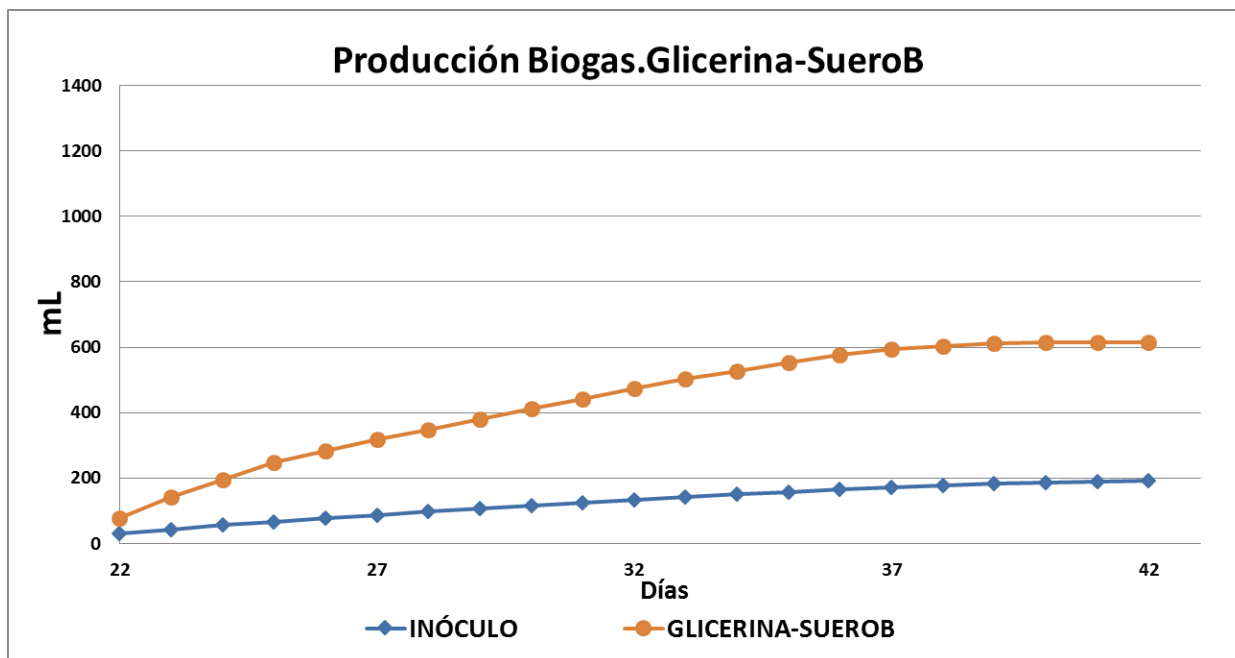
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de glicerina y suero bruto. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de la mezcla de glicerina y suero bruto.

En la **fase 1**, como se puede observar en la gráfica 129 la producción de biogás de la mezcla de glicerina y el suero, presenta un crecimiento hasta el día 3. Del día 3 al 11, la producción de biogás se ralentiza. Del día 11 al 14, presenta un incremento en la producción de biogás, a partir del cual se estabiliza, generando una producción total de biogás de 594 mL.



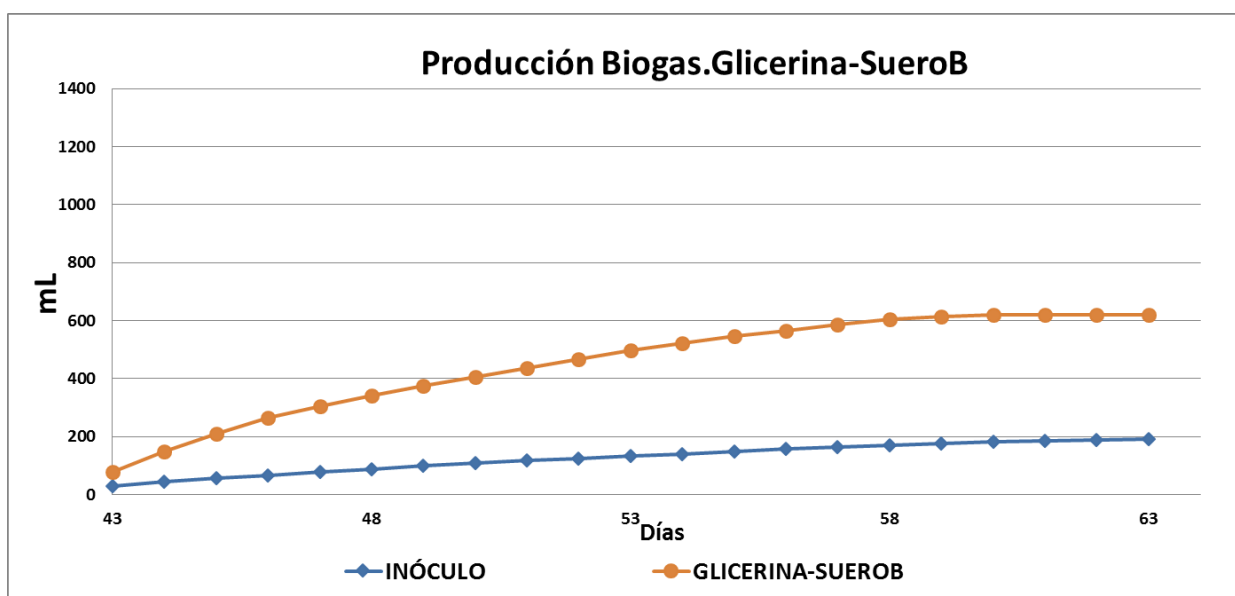
Gráfica 129. Producción de Biogás Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

En la **fase 2** del ensayo, la producción de biogás de la mezcla de glicerina y el suero, presenta un crecimiento hasta el día 36, a partir del cual se estabiliza, generando una producción total de biogás de 615 mL. Tal y como se puede observar en la gráfica 130.



Gráfica 130. Producción de Biogás Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

Como se puede observar en la gráfica 131, que corresponde con la **fase 3** del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de glicerina y suero bruto. La producción de biogás de la mezcla de glicerina y el suero, presenta un crecimiento hasta el día 58, a partir del cual se estabiliza, generando una producción total de biogás de 621 mL.

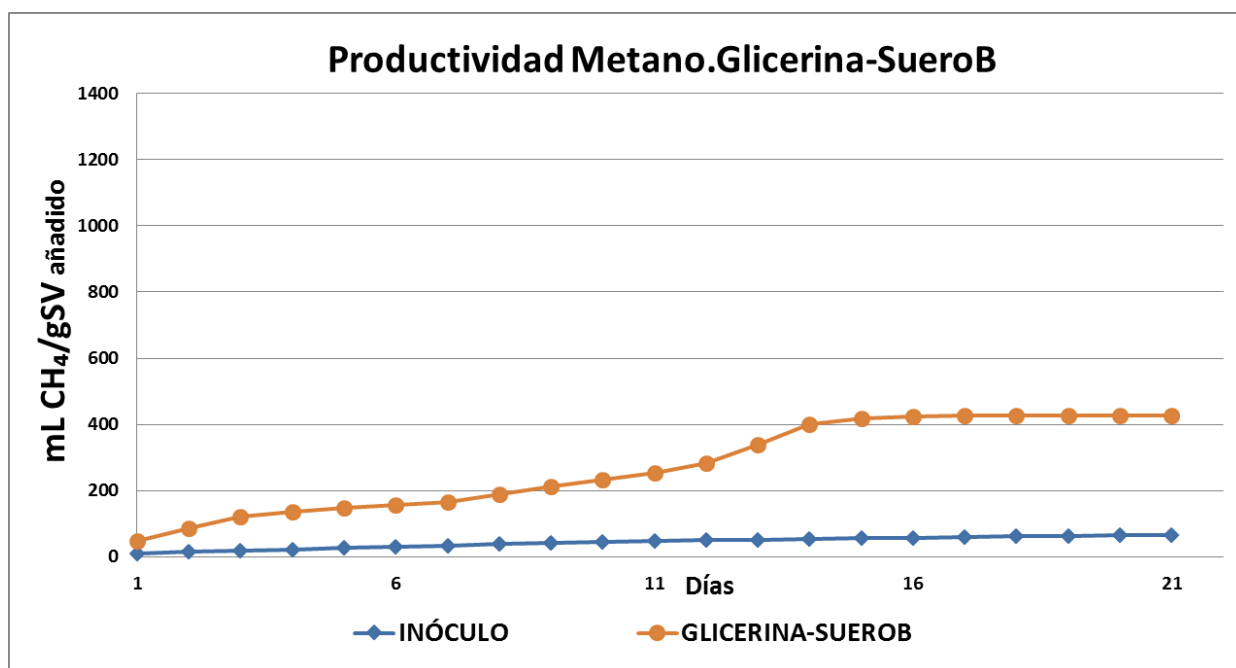


Gráfica 131. Producción de Biogás Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

### 5.3.4.2. Productividad de Metano

En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de glicerina y suero bruto, de las distintas fases temporales.

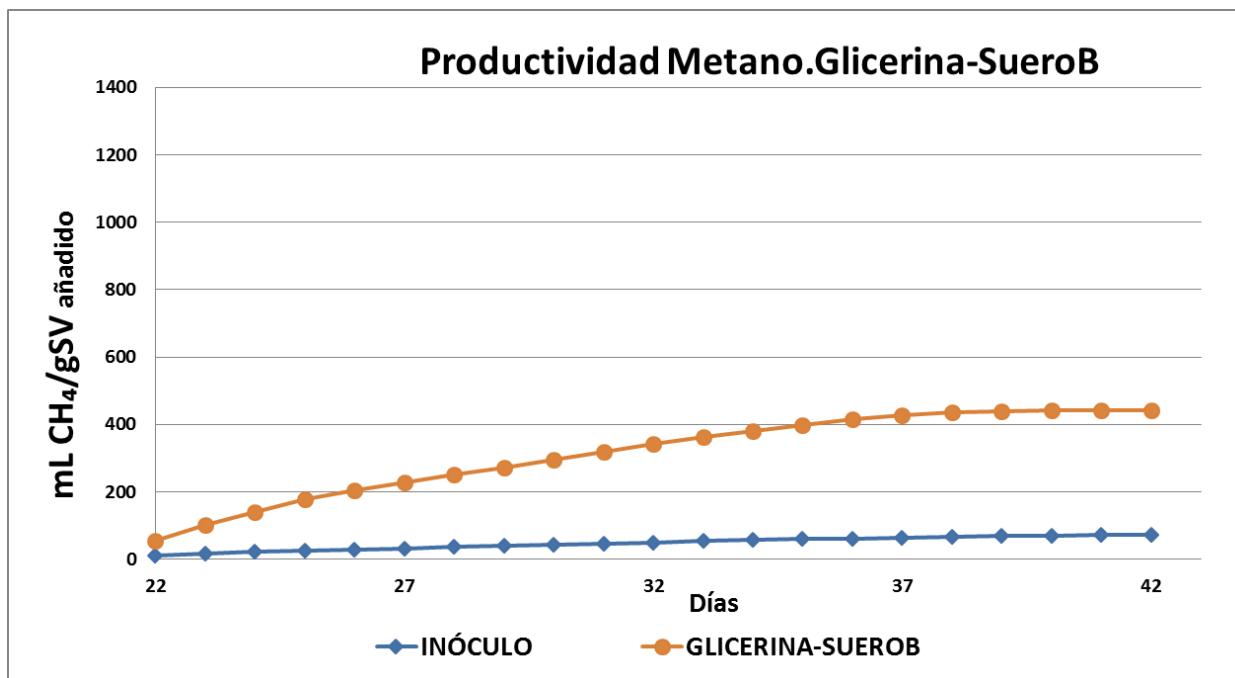
En la **fase 1** del ensayo la productividad de la glicerina-suero bruto es de 427 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, superior al inóculo de tan solo 65 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>. Tal y como se representa en la gráfica 132.



Gráfica 132. Productividad Metano Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

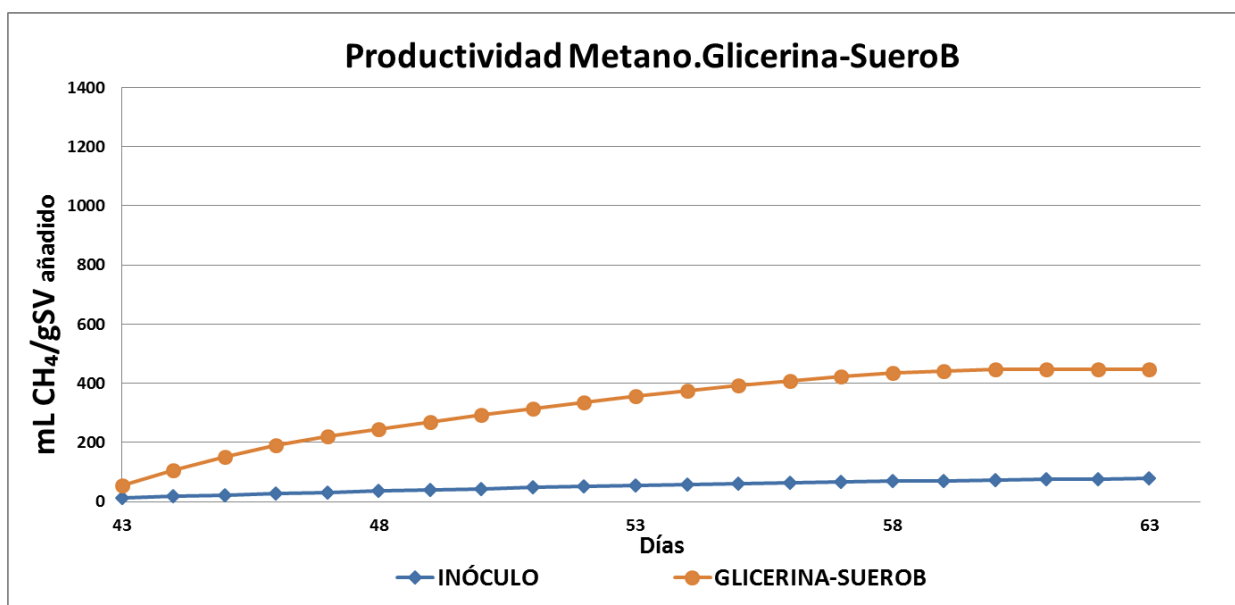
Como se observa en la gráfica 133, que corresponde con la **fase 2** del ensayo. La productividad de la mezcla de glicerina y suero bruto es de 443 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, superior al inóculo de tan solo 72 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.





Gráfica 133. Productividad Metano Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

En la **fase 3**, la productividad de la mezcla de glicerina y suero bruto es de 447mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, como se observa en la gráfica 134, superior al inóculo de tan solo 78 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 134. Productividad Metano Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

#### **5.3.4.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. La mezcla de glicerina y suero bruto presenta un porcentaje de metano en el biogás del 65%, un 10% superior al inóculo (55%).

A la vista de los resultados, la adición de la mezcla de glicerina y suero bruto en una digestión anaerobia ha conducido a un incremento en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al inóculo. La mezcla de suero bruto con la glicerina mejora satisfactoriamente la tratabilidad de la glicerina.

### 5.3.5. Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos de Lixiviado y Suero Bruto

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de lixiviado y suero bruto. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1** como se representa en la tabla 73, la mezcla de lixiviado y suero bruto presenta una eliminación de materia orgánica del 66%. El porcentaje de eliminación de los sólidos volátiles es de 32%. Sin embargo, en porcentaje de eliminación en los sólidos totales inferior, alcanzando un 25%.

Tabla 73. Ensayo Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

#### Lixiviado-Suero Bruto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	18.100,11 ±0,77	10.120,01 ±0,80	66
ST	mg L <sup>-1</sup>	13.500,20 ±0,87	10.120,02 ±0,90	25
Materia Seca	%	1,35	1,01	
SV	mg L <sup>-1</sup>	8.150,63 ±0,90	5.560,00 ±0,88	32
Materia Volátil	%	60,37	54,94	
pH		7,00 ±0,01	7,30 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	12,34 ±0,02	12,30 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	1.850,00 ±1,08	5.800,88 ±1,05	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	320,22 ±0,95	380,00 ±1,03	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	384,33 ±0,95	456,66 ±1,03	
Relación AGV/Alcalinidad		0,17	0,07	

En la **fase 2**, la mezcla de lixiviado con el suero bruto presenta una eliminación de DQO del 50%. El porcentaje de eliminación de los sólidos volátiles es de 43%. Sin embargo, en porcentaje de eliminación en los sólidos totales inferior, alcanzando un 27%. cabe destacar que la conductividad presenta un incremento a la salida del ensayo, llegando a  $5.800,74 \pm 1,02 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . Tal y como se muestra en la tabla 74.

Tabla 74. Ensayo Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

#### Lixiviado-Suero Bruto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$20.145,01 \pm 0,71$	$10.070,25 \pm 0,78$	50
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$14.680,12 \pm 0,82$	$10.750,36 \pm 0,82$	27
Materia Seca	%	1,47	1,08	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$9.751,42 \pm 0,83$	$5.540,56 \pm 0,88$	43
Materia Volátil	%	66,42	51,53	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,30 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,34 \pm 0,02$	$12,30 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$1.800,62 \pm 1,03$	$5.800,74 \pm 1,02$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$310,34 \pm 1,00$	$379,31 \pm 0,95$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$372,41 \pm 1,00$	$455,17 \pm 0,95$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,17	0,07	

En la tabla 75, se muestran los resultados analíticos de la **fase 3**. La mezcla de lixiviado y suero bruto presenta una eliminación de materia orgánica del 51%. El porcentaje de eliminación de los sólidos volátiles es de 38%, similar al porcentaje de eliminación de los sólidos totales 35%. cabe destacar que la conductividad presenta un incremento a la salida del ensayo, llegando a  $5.850,36 \pm 1,00 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ .

Tabla 75. Ensayo Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

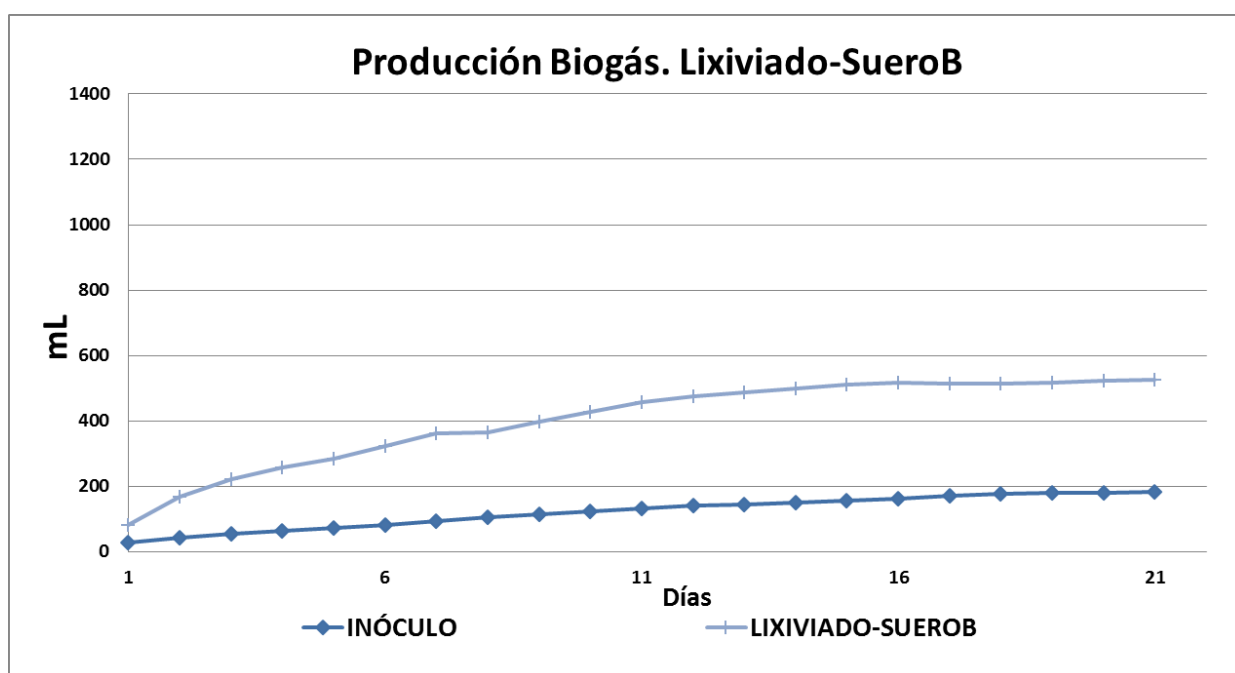
#### Lixiviado-Suero Bruto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$19.986,36 \pm 0,79$	$9.875,98 \pm 0,76$	51
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$15.430,12 \pm 0,89$	$9.980,75 \pm 0,90$	35
Materia Seca	%	1,54	1,00	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$10.000,45 \pm 0,85$	$6.210,31 \pm 0,82$	38
Materia Volátil	%	64,81	62,22	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,30 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,34 \pm 0,02$	$12,30 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$2.000,28 \pm 1,05$	$5.850,36 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$212,18 \pm 1,03$	$380,21 \pm 0,96$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$273,99 \pm 1,03$	$457,17 \pm 0,96$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,11	0,06	

### 5.3.5.1. Producción de Biogás

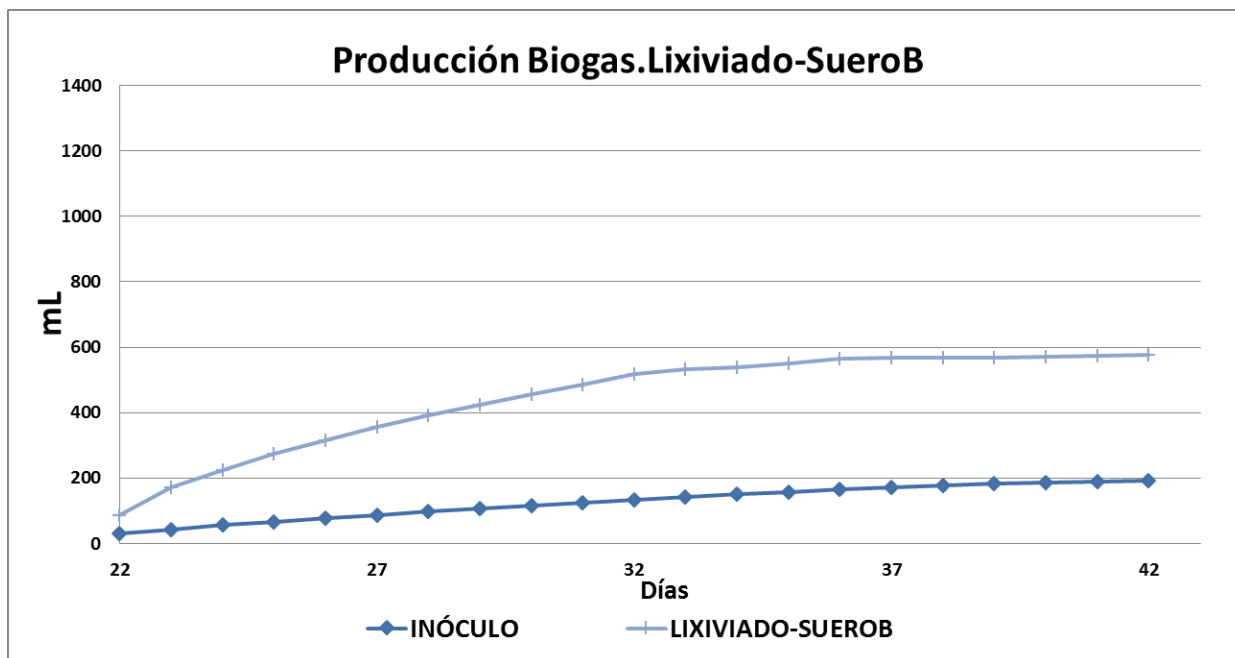
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de lixiviado y suero bruto. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de la mezcla de lixiviado y suero bruto.

En la **fase 1**, como se puede observar en la gráfica 135. La mezcla de lixiviado y suero bruto presenta un crecimiento exponencial hasta el día 6. En el día 7, presenta una disminución de la producción de biogás, a partir del cual aumenta el volumen de biogás hasta el día 14, estabilizándose. La producción total de biogás es 525 mL



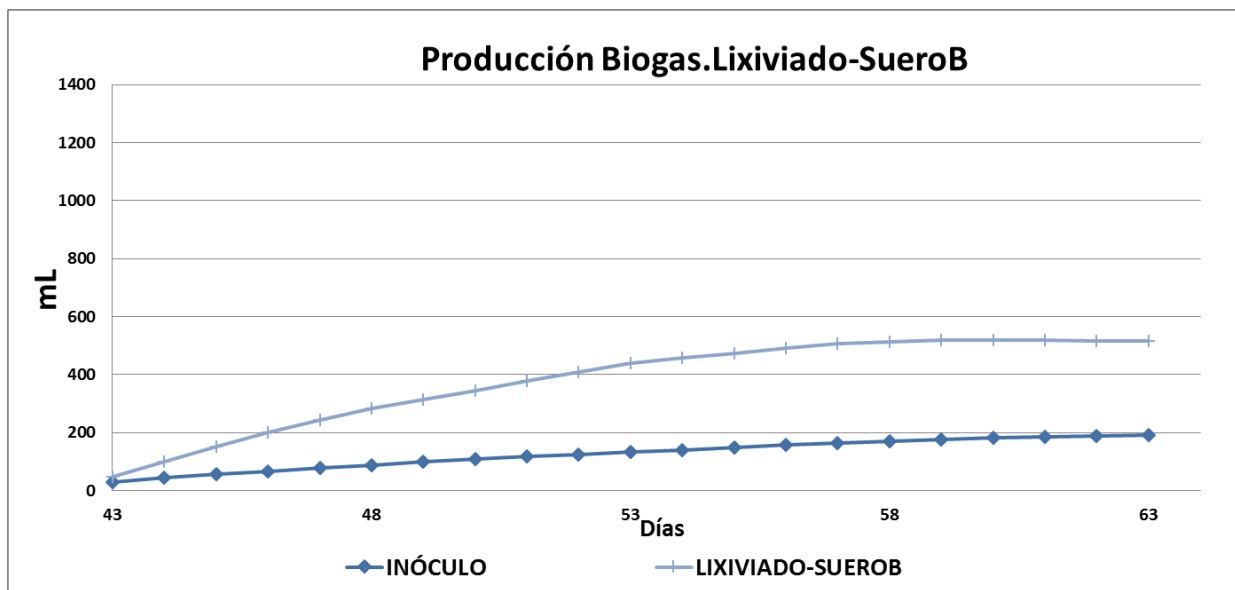
Gráfica 135. Producción Biogás Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

Como se puede observar en la gráfica 136, respecto a la **fase 2**. La mezcla del lixiviado y suero bruto presenta un crecimiento exponencial hasta el día 32, estabilizándose. La producción total de biogás es 575 mL.



Gráfica 136. Producción Biogás Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

En la **fase 3**, el ensayo de la mezcla de Lixiviado-Suero Bruto presenta un crecimiento hasta el día 53, estabilizándose. La producción total de biogás es 516 mL, siendo superior al inóculo. Tal y como se muestra en la gráfica 137.

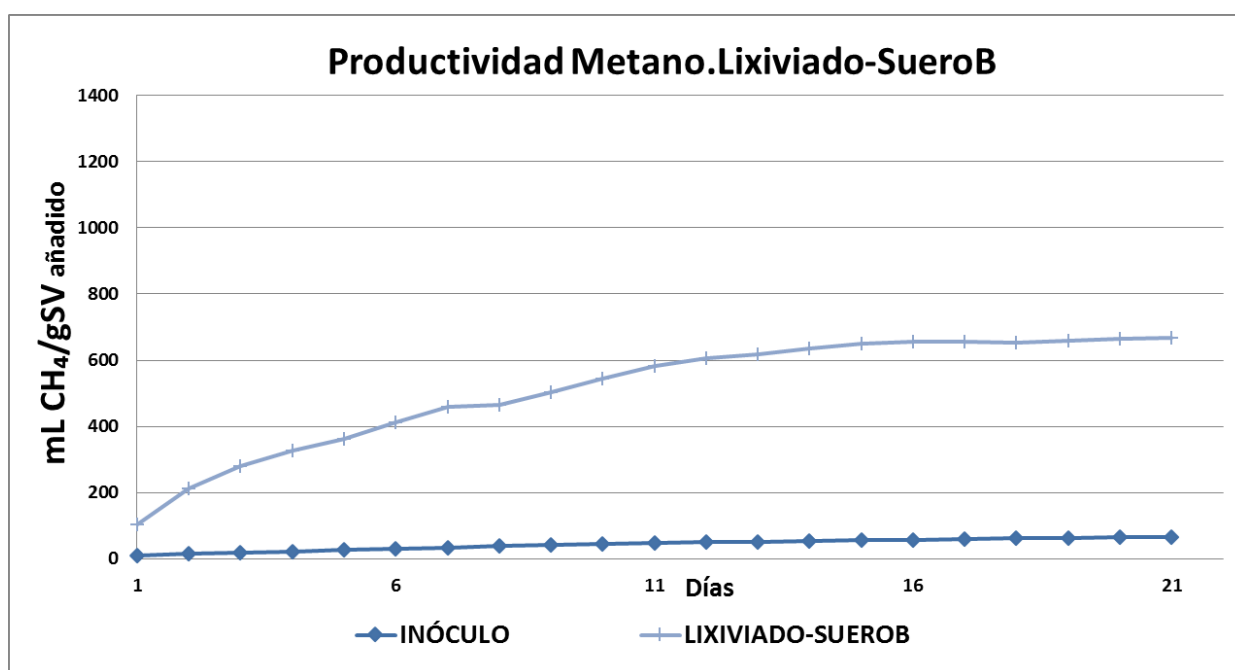


Gráfica 137. Producción Biogás Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

### 5.3.5.2. Productividad de Metano

En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de lixiviado y suero bruto, de las distintas fases temporales.

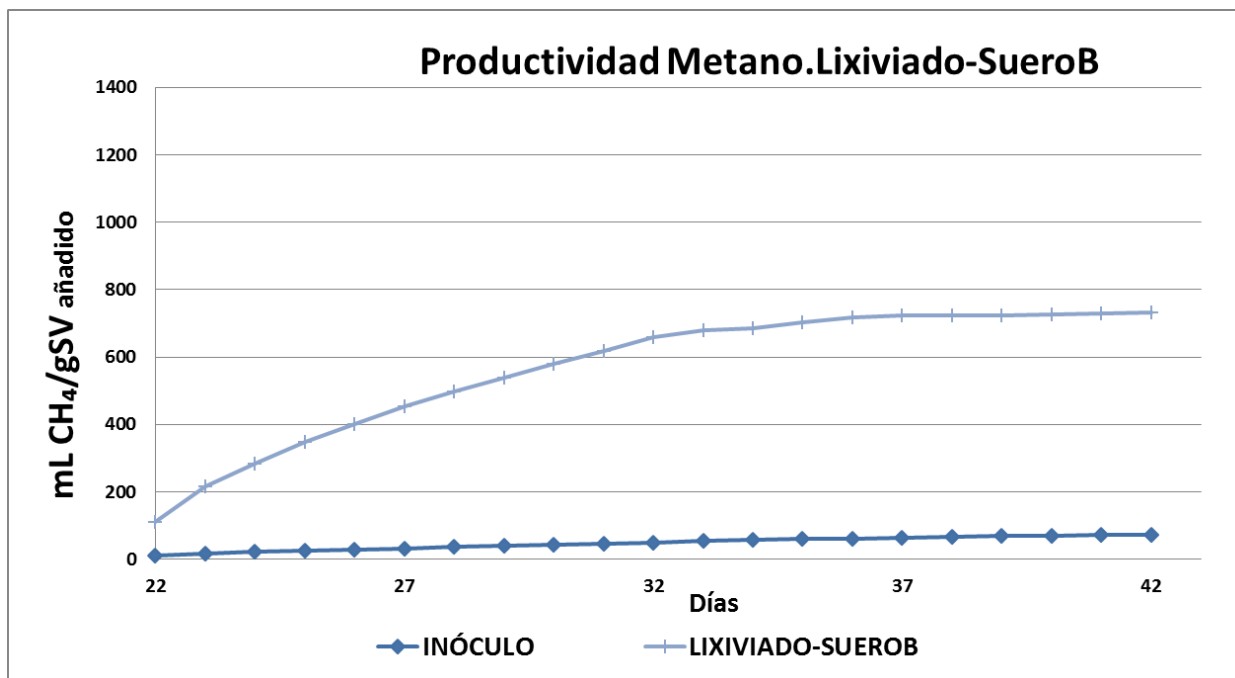
En la **fase 1**, la productividad de metano en el ensayo de la mezcla de Lixiviado-Suero Bruto es de 668 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, como se observa en la gráfica 138.



Gráfica 138. Productividad Metano Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

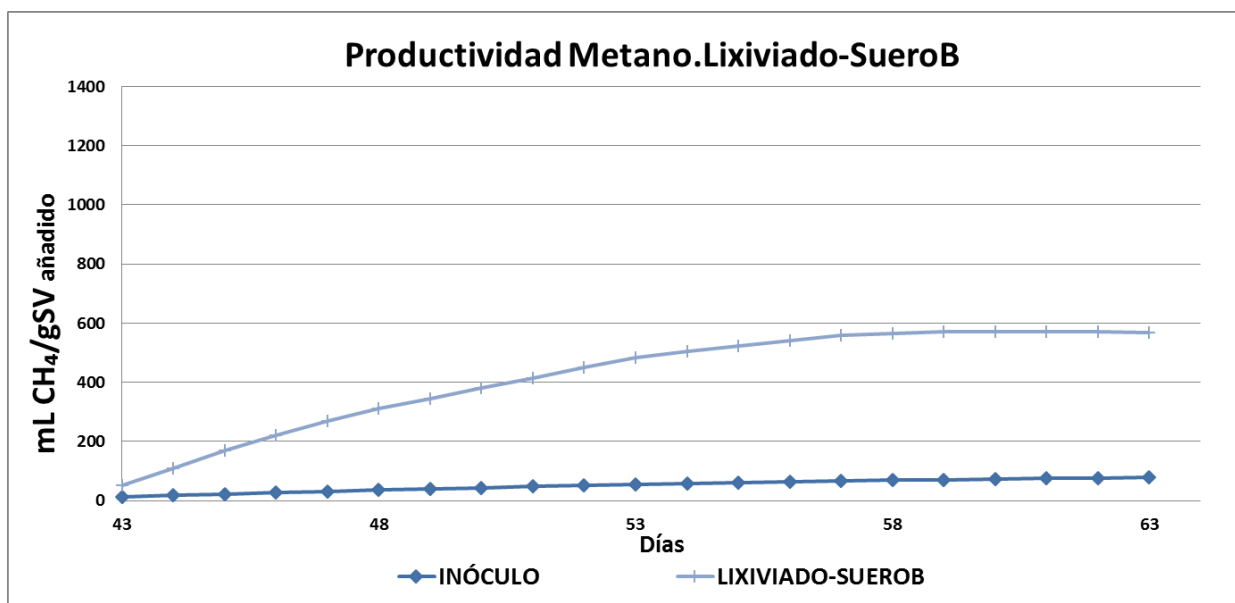
Como se representa en la gráfica 139, respecto a la **fase 2** del ensayo. La productividad de metano en el ensayo de la mezcla de Lixiviado-Suero Bruto es de 733 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.





Gráfica 139. Productividad Metano Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

La productividad de la **fase 3** del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de lixiviado y suero bruto presenta una productividad de metano de 568 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, como se muestra en la gráfica 140.



Gráfica 140. Productividad Metano Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

#### **5.3.5.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en las dos primeras fases, aunque disminuye en la última fase. La mezcla de glicerina y suero bruto presenta un porcentaje de metano en el biogás del 65%, un 10% superior al inóculo (55%), en las dos primeras fases.

En la última fase el porcentaje de metano en el biogás disminuye hasta un 60%, un 5% superior al inóculo (55%).

A la vista de los resultados, la adición de la mezcla del lixiviado y suero bruto en una digestión anaerobia ha conducido a un incremento en la producción de biogás y en la productividad de metano. La mezcla del suero bruto con el lixiviado mejora notablemente la tratabilidad del lixiviado.

### 5.3.6. Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos de Aceite usado de cocina y Alperujo

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de aceite usado de cocina y alperujo. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

Los resultados de los análisis de la **fase 1**, se muestran en la tabla 76. El ensayo de Aceite-Alperujo presenta una eliminación de materia orgánica del 56%. El porcentaje de eliminación de SV es del 33% y, el de ST es de un 33%. La alcalinidad a la salida del ensayo, es de  $6.110,54 \pm 1,00 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . El pH aumenta en la salida del ensayo a  $7,25 \pm 0,01$ .

Tabla 76. Ensayo Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

#### Aceite-Alperujo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$29.560,01 \pm 0,72$	$12.896,49 \pm 0,76$	56
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$21.130,50 \pm 0,83$	$14.130,33 \pm 0,86$	33
Materia Seca	%	2,11	1,41	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$14.610,11 \pm 0,85$	$9.780,03 \pm 0,88$	33
Materia Volátil	%	69,14	69,21	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,25 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,00 \pm 0,02$	$12,00 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.895,00 \pm 1,07$	$6.110,54 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$900,22 \pm 0,90$	$1.000,58 \pm 1,04$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$1.079,39 \pm 0,90$	$1.200,41 \pm 1,04$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,23	0,16	

Como se observa en la tabla 78 que corresponde con la **fase 2**, el ensayo de Aceite-Alperujo presenta una eliminación de DQO del 51%. El porcentaje de eliminación de SV es del 40% y, el de ST es de un 34%. La alcalinidad a la salida del ensayo, es de 6.110,14  $\pm 1,00$  mg  $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . El pH aumenta en la salida del ensayo a 7,25  $\pm 0,01$ . La relación AGV/ alcalinidad, disminuye de un 0,24 a un 0,16.

Tabla 77. Ensayo Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

#### Aceite-Alperujo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg $\text{L}^{-1}$	30.043,84 $\pm 0,78$	14.756,66 $\pm 0,77$	51
ST	mg $\text{L}^{-1}$	22.457,71 $\pm 0,80$	14.786,50 $\pm 0,81$	34
Materia Seca	%	2,25	1,48	
SV	mg $\text{L}^{-1}$	16.780,42 $\pm 0,90$	10.140,30 $\pm 0,82$	40
Materia Volátil	%	74,72	68,58	
pH		7,00 $\pm 0,01$	7,25 $\pm 0,01$	
Conductividad	mS $\text{cm}^{-1}$	12,00 $\pm 0,02$	12,00 $\pm 0,02$	
Alcalinidad	mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	3.800,22 $\pm 1,01$	6.110,14 $\pm 1,00$	
AGV	mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	896,55 $\pm 0,90$	988,79 $\pm 1,04$	
AGV	mg $\text{CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	1.075,86 $\pm 0,90$	1.186,55 $\pm 1,04$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,24	0,16	

En la **fase 3**, el ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de aceite usado de cocina y alperujo presenta una eliminación de DQO del 50%. El porcentaje de eliminación de SV es del 35% y, el de ST es de un 29%. La alcalinidad a la salida del ensayo, es de 5.400,10  $\pm 1,05$  mg  $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . El pH aumenta en la salida del ensayo a 7,25  $\pm 0,01$  y, a relación AGV/ alcalinidad pasa de un 0,21 a un 0,18. Como se observa en la tabla 78.

Tabla 78. Ensayo Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

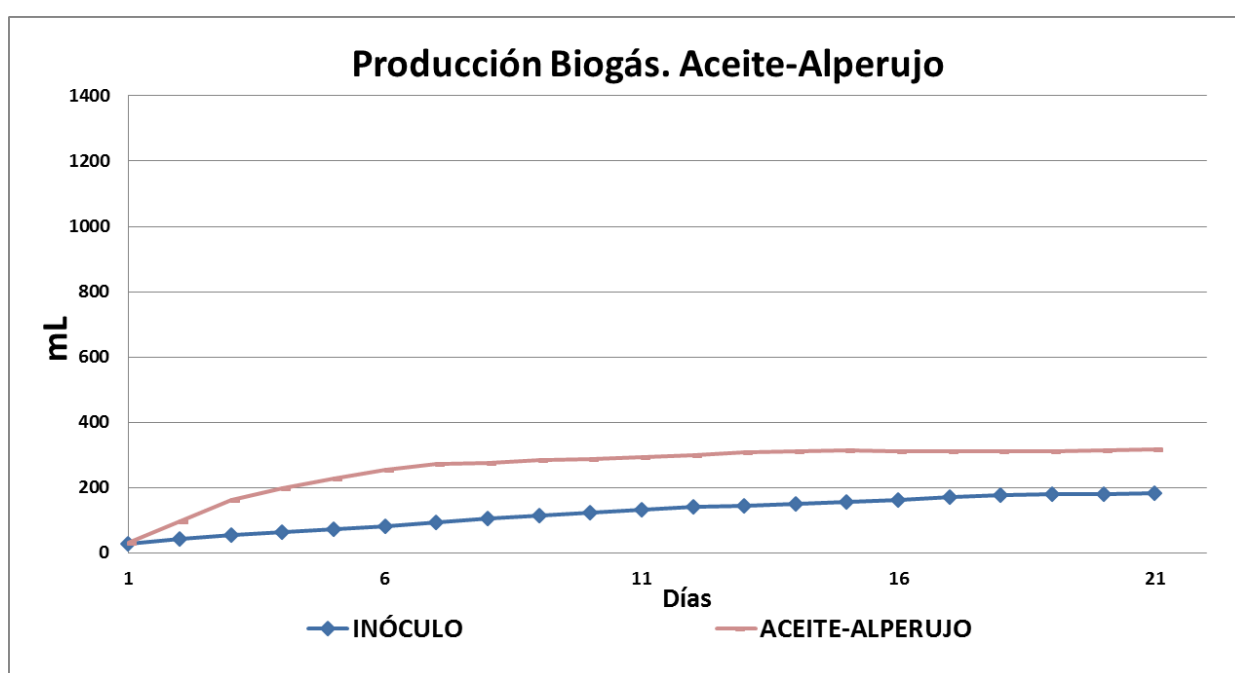
### Aceite-Alperujo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg $\text{L}^{-1}$	28.675,66 $\pm 0,74$	14.320,23 $\pm 0,78$	50
ST	mg $\text{L}^{-1}$	20.780,85 $\pm 0,83$	14.680,74 $\pm 0,85$	29
Materia Seca	%	2,08	1,47	
SV	mg $\text{L}^{-1}$	15.670,12 $\pm 0,90$	10.240,66 $\pm 0,90$	35
Materia Volátil	%	75,41	69,75	
pH		7,00 $\pm 0,01$	7,25 $\pm 0,01$	
Conductividad	mS $\text{cm}^{-1}$	12,00 $\pm 0,02$	12,00 $\pm 0,02$	
Alcalinidad	mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	3.850,12 $\pm 1,08$	5.400,10 $\pm 1,05$	
AGV	mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	796,99 $\pm 0,91$	990,45 $\pm 1,03$	
AGV	mg $\text{CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	975,33 $\pm 0,91$	1.200,66 $\pm 1,03$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,21	0,18	

### 5.3.6.1. Producción de Biogás

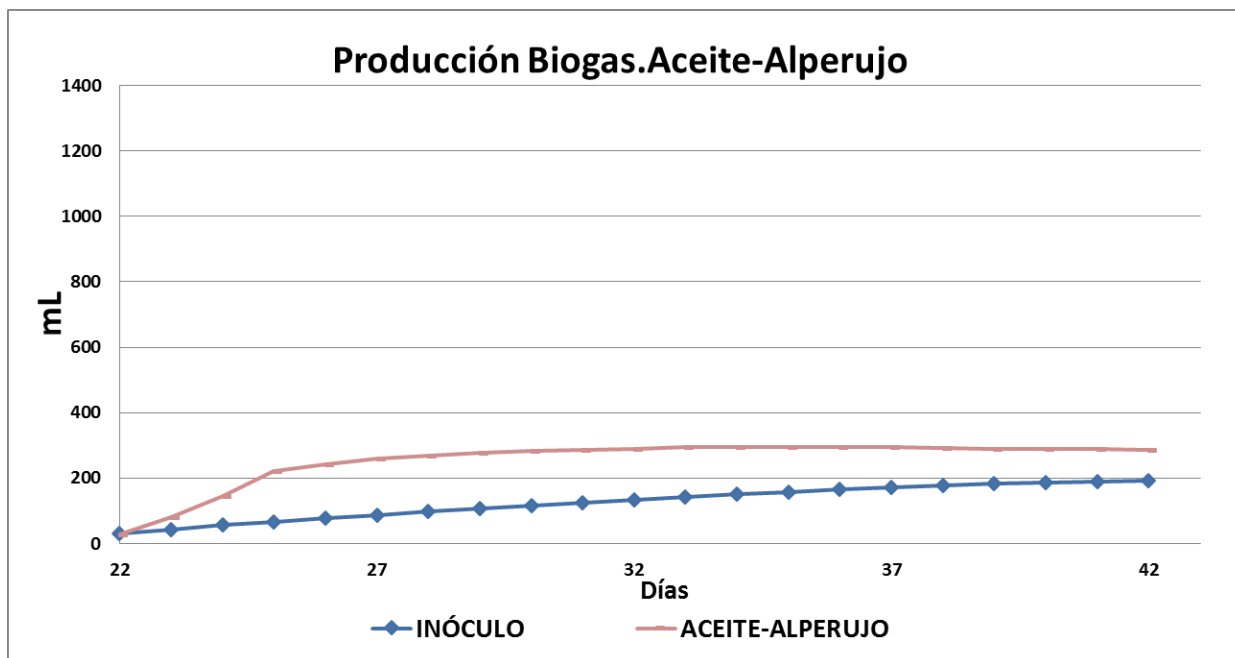
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de aceite usado de cocina y alperujo. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de la mezcla de aceite usado de cocina y alperujo.

Como se puede observar en la gráfica 141, respecto a la **fase 1** del ensayo. La producción de biogás de la mezcla de Aceite-Alperujo presenta un crecimiento hasta el día 6, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, generando un volumen total de 316 mL.



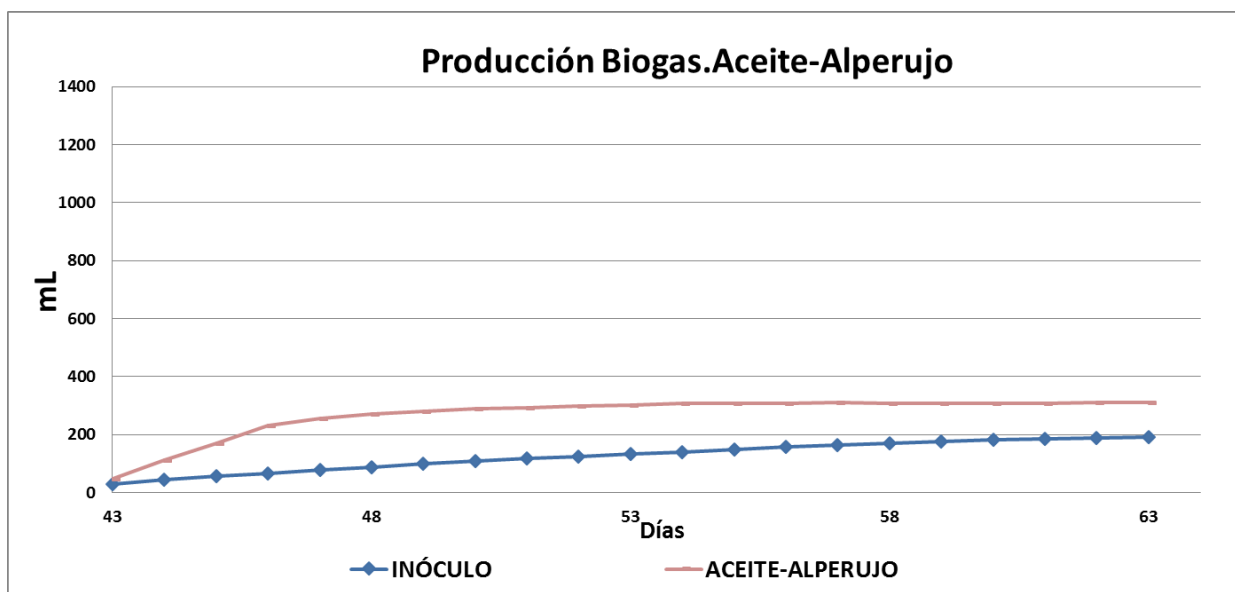
Gráfica 141. Producción Biogás Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

En la **fase 2**, la producción de biogás de la mezcla de Aceite-Alperujo presenta un crecimiento hasta el día 25, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, generando un volumen total de 287 mL, como se puede observar en la gráfica 142.



Gráfica 142. Producción Biogás Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

En la **fase 3** del ensayo (gráfica 143), la producción de biogás de la mezcla de Aceite-Alperujo presenta un crecimiento hasta el día 46, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, generando un volumen total de 310 mL.

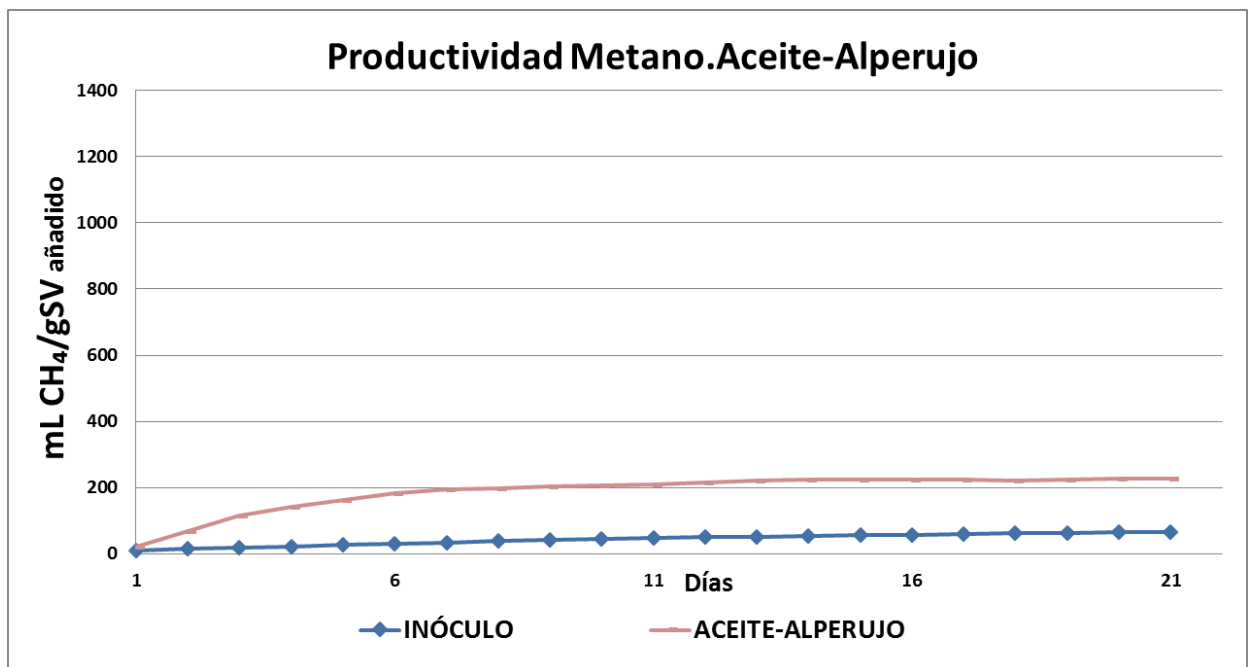


Gráfica 143. Producción Biogás Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

### 5.3.6.2. Productividad de Metano

En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de aceite usado de cocina y alperujo, de las distintas fases temporales.

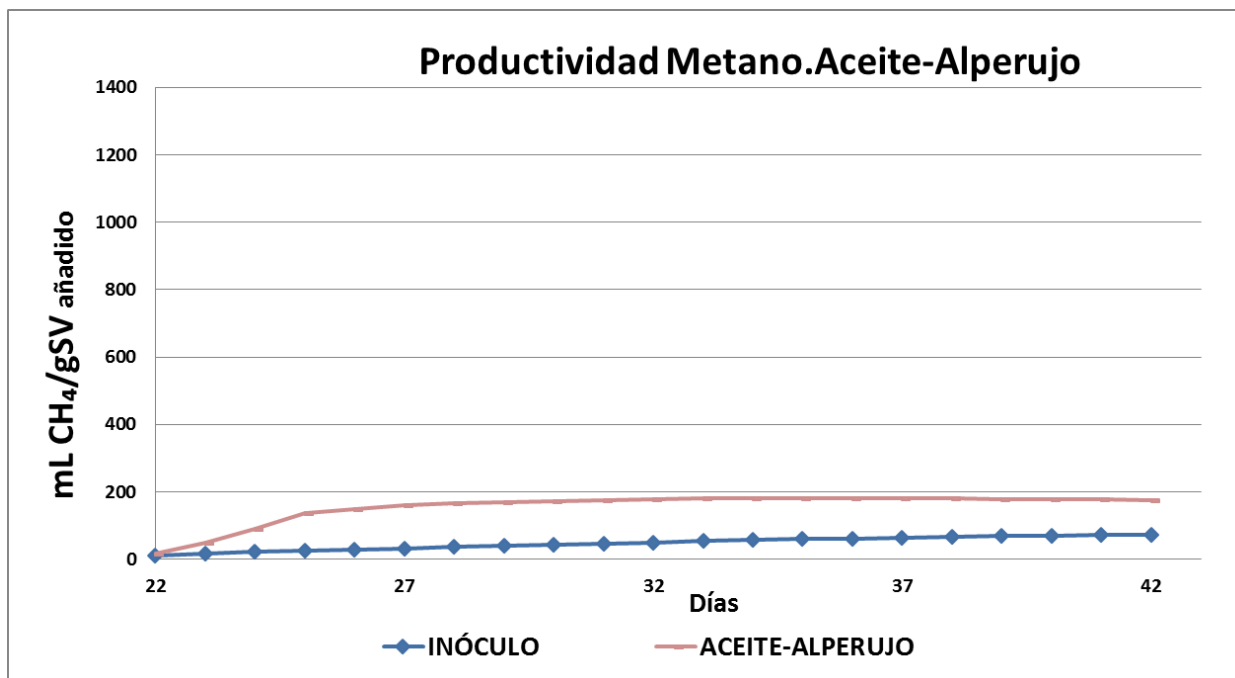
En la **fase 1** como se muestra en la gráfica 144, la productividad de metano de la mezcla del aceite y alperujo es de 228 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> y, la productividad del inóculo es de 65 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 144. Productividad Metano Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

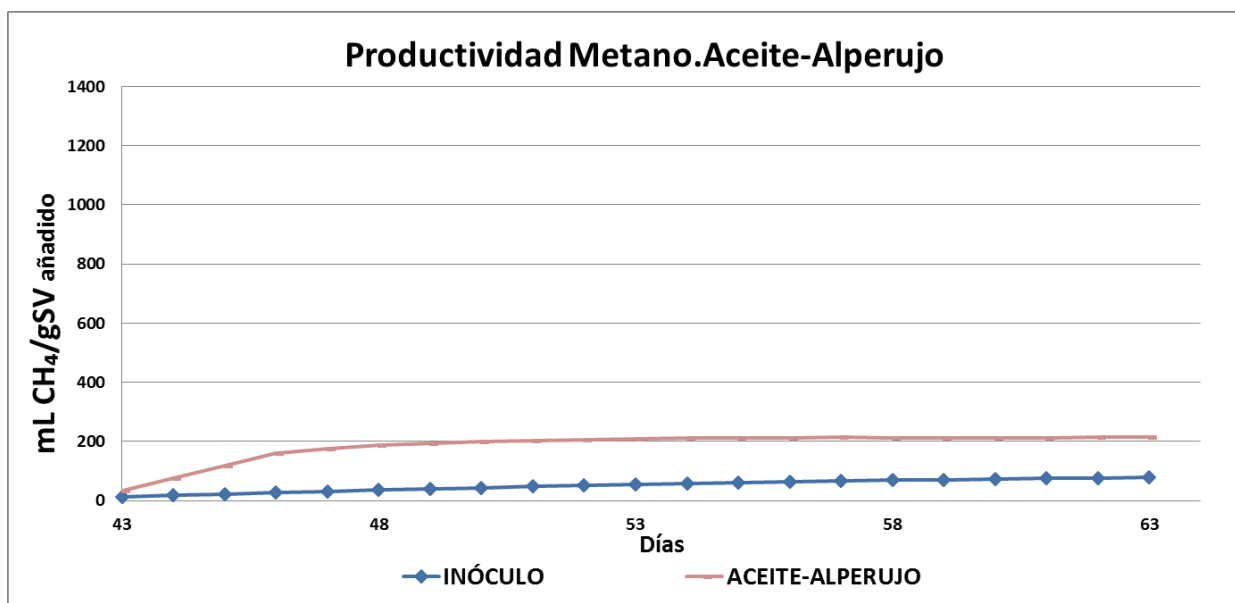
Tal y como se muestra en la gráfica 145, respecto a la **fase 2**, la productividad de metano de la mezcla del aceite y alperujo es de 176 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, superior a la productividad del inóculo (72 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).





Gráfica 145. Productividad Metano Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

En la **fase 3**, la productividad de metano de la mezcla del aceite y alperujo es de 214 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, superior a la productividad del inóculo (78 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>). Tal y como se muestra en la gráfica 146.



Gráfica 146. Productividad Metano Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

#### **5.3.6.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que disminuye en las dos últimas fases. En la primera fase la mezcla de aceite usado de cocina y alperujo presenta un porcentaje de metano en el biogás del 73%, aumentando en un 18% con respecto al ensayo del inóculo (55%).

En las dos últimas fases el porcentaje disminuye hasta un 70%, aumentando en un 15% con respecto al ensayo del inóculo (55%)

A la vista de los resultados, la adición de la mezcla de aceite usado de cocina y alperujo en una digestión anaerobia ha conducido a un incremento mínimo en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al inóculo.

### 5.3.7. Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos de Aguas de Glicerina y Lixiviado

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de glicerina y lixiviado. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

Los resultados analíticos de la **fase 1**, se muestran en la tabla 79, el ensayo de la mezcla de Glicerina-Lixiviado presenta una eliminación de DQO del 56%. La eliminación de SV presenta un porcentaje del 33%, siendo inferior el porcentaje de eliminación en los ST (28%). Cabe destacar que el porcentaje de materia volátil, solo disminuye alrededor de un 4,42%

Tabla 79. Ensayo Glicerina-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

#### Glicerina-Lixiviado

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	20.244,22 ±0,75	8.849,00 ±0,80	56
ST	mg L <sup>-1</sup>	14.920,01 ±0,81	10.720,66 ±0,83	28
Materia Seca	%	1,49	1,07	
SV	mg L <sup>-1</sup>	8.885,03 ±0,87	5.910,01 ±0,88	33
Materia Volátil	%	59,55	55,13	
pH		7,00 ±0,01	7,41 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	16,99 ±0,02	16,00 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	1.502,12 ±1,05	5.600,22 ±1,05	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	560,51 ±1,03	800,66 ±1,02	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	672,58 ±1,03	987,33 ±1,02	
Relación AGV/Alcalinidad		0,37	0,14	

En la **fase 2**, el ensayo de la Glicerina-Lixiviado presenta una eliminación de materia orgánica del 39%. La eliminación de SV presenta un porcentaje del 20%, siendo inferior el porcentaje de eliminación en los ST (27%). Cabe destacar que el porcentaje de materia volátil, aumenta entorno a un 3%, como se observa en la tabla 80.

Tabla 80. Ensayo Glicerina-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

#### Glicerina-Lixiviado

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	22.451,24 ±0,78	13.760,44 ±0,70	39
ST	mg L <sup>-1</sup>	15.012,63 ±0,82	11.470,81 ±0,90	24
Materia Seca	%	1,50	1,15	
SV	mg L <sup>-1</sup>	9.586,14 ±0,90	7.645,35 ±0,88	20
Materia Volátil	%	63,86	66,65	
pH		7,00 ±0,01	7,41 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	16,99 ±0,02	16,00 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	1.470,58 ±1,06	5.600,74 ±1,02	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	538,79 ±1,03	1.000,91 ±0,92	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	646,55 ±1,03	1.199,60 ±0,92	
Relación AGV/Alcalinidad		0,37	0,18	

Como se observa en la tabla 81 que corresponde con la **fase 3**, el ensayo de la Glicerina-Lixiviado presenta una eliminación de materia orgánica del 40%. La eliminación de SV presenta un porcentaje del 31%, siendo superior el porcentaje de eliminación en los ST (36%). Cabe destacar que el porcentaje de materia volátil, solo disminuye alrededor de un 4,63% y, el pH aumenta a un  $7,41 \pm 0,01$ .

Tabla 81. Ensayo Glicerina-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

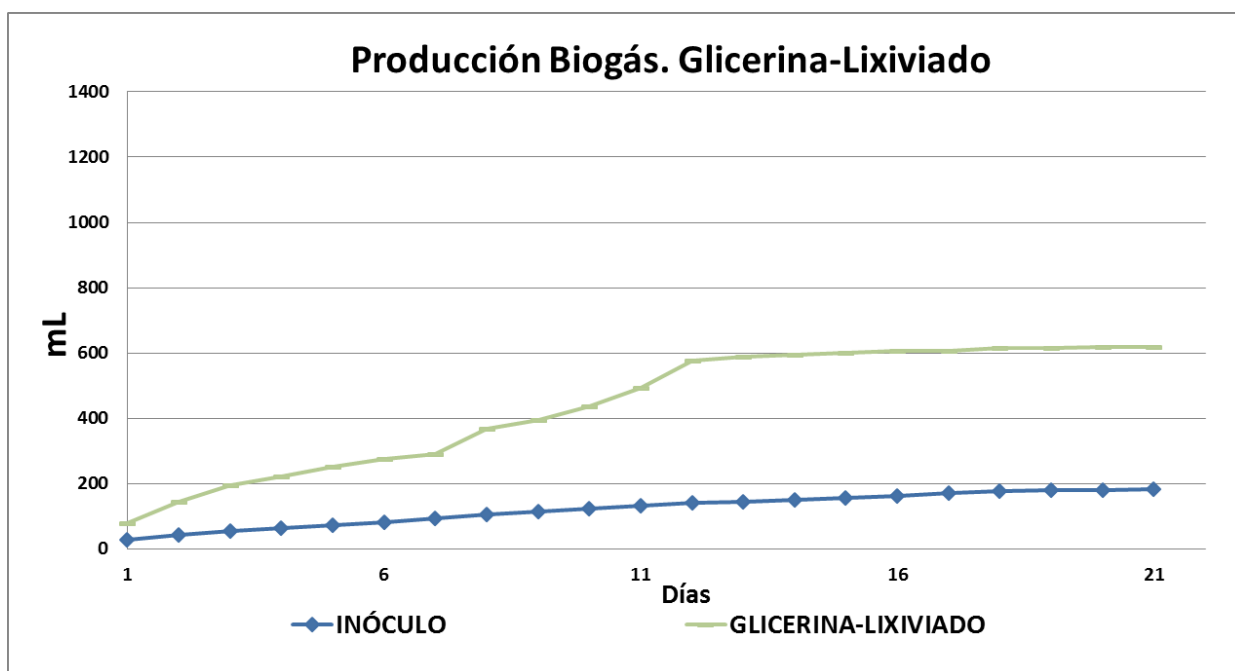
#### Glicerina-Lixiviado

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	22.210,11 ±0,77	13.320,23 ±0,77	40
ST	mg L <sup>-1</sup>	15.480,63 ±0,87	9.870,74 ±0,85	36
Materia Seca	%	1,55	0,99	
SV	mg L <sup>-1</sup>	9.540,85 ±0,82	6.540,22 ±0,83	31
Materia Volátil	%	61,63	66,26	
pH		7,00 ±0,01	7,41 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	16,99 ±0,02	16,00 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	1.500,33 ±1,00	5.700,63 ±1,03	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	638,79 ±0,97	995,00 ±1,04	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	746,55 ±0,97	1.192,00 ±1,04	
Relación AGV/Alcalinidad		0,43	0,17	

### 5.3.7.1. Producción de Biogás

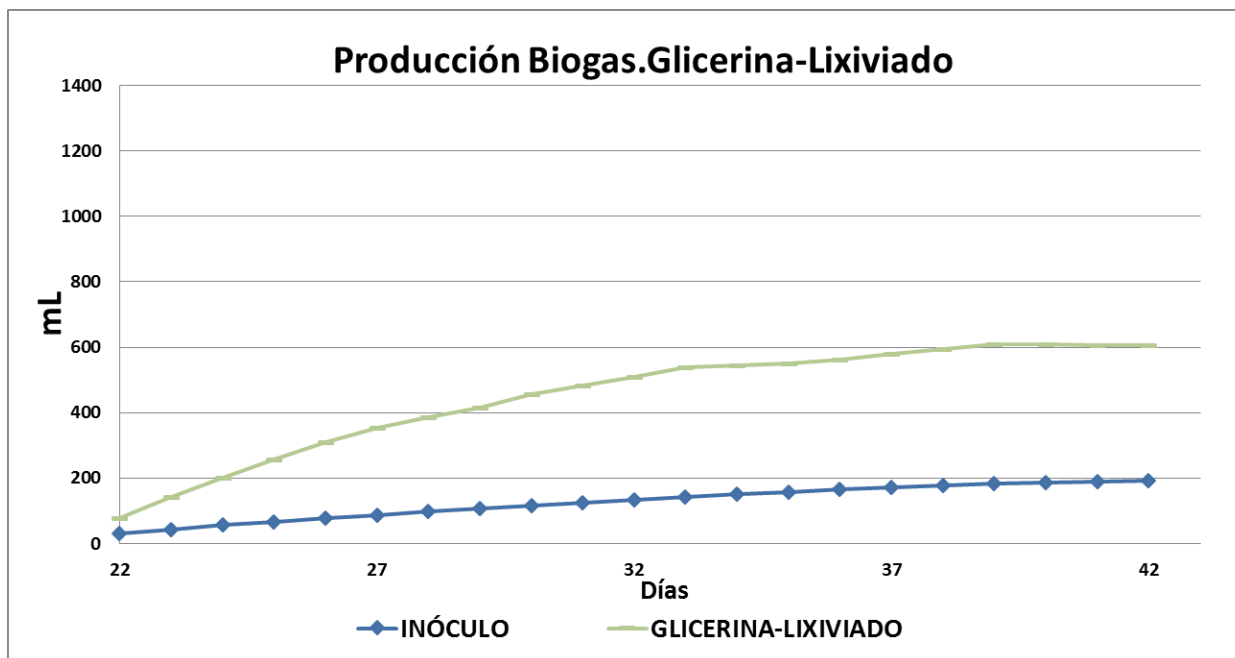
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de glicerina y lixiviado. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de la mezcla de glicerina y lixiviado.

La producción de biogás de la **fase 1** se representa en la gráfica 147, la mezcla de Glicerina-Lixiviado presenta una producción de biogás, que se puede dividir en varias etapas. Se puede observar un crecimiento hasta el día 7. A partir del cual presenta un crecimiento exponencial en la generación de biogás hasta el día 11, que se estabiliza. La producción total de biogás es de 618 mL, superior al inóculo de tan solo 182 mL.



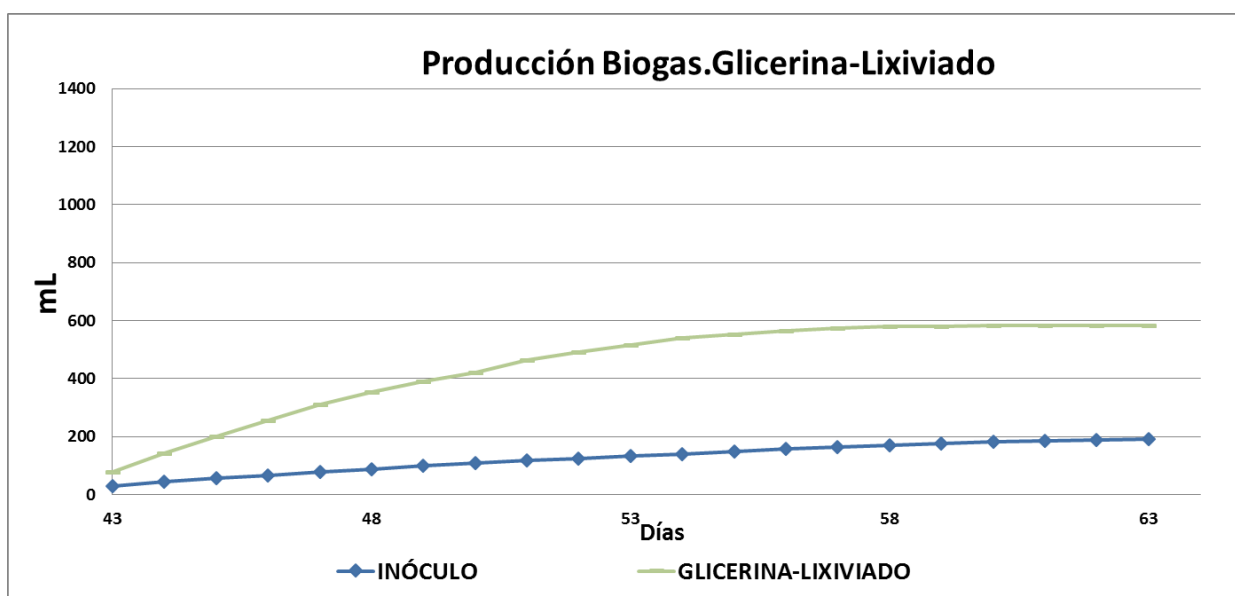
Gráfica 147. Producción Biogás Glicerina-Lixiviado, Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

Como se representa en la gráfica 148 que corresponde con la **fase 2**, la mezcla de Glicerina-Lixiviado presenta crecimiento en la generación de biogás hasta el día 39, a partir del cual se estabiliza. La producción total de biogás es de 607 mL, superior al inóculo (193 mL), incrementando la producción de biogás en 414 mL



Gráfica 148. Producción Biogás Glicerina-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

En la **fase 3** la producción de biogás en el ensayo de la mezcla de Glicerina-Lixiviado presenta un crecimiento hasta el día 55, a partir del cual se estabiliza. La producción total de biogás es de 584 mL, superior al inóculo de tan solo 191 mL, tal y como se observa en la gráfica 149.

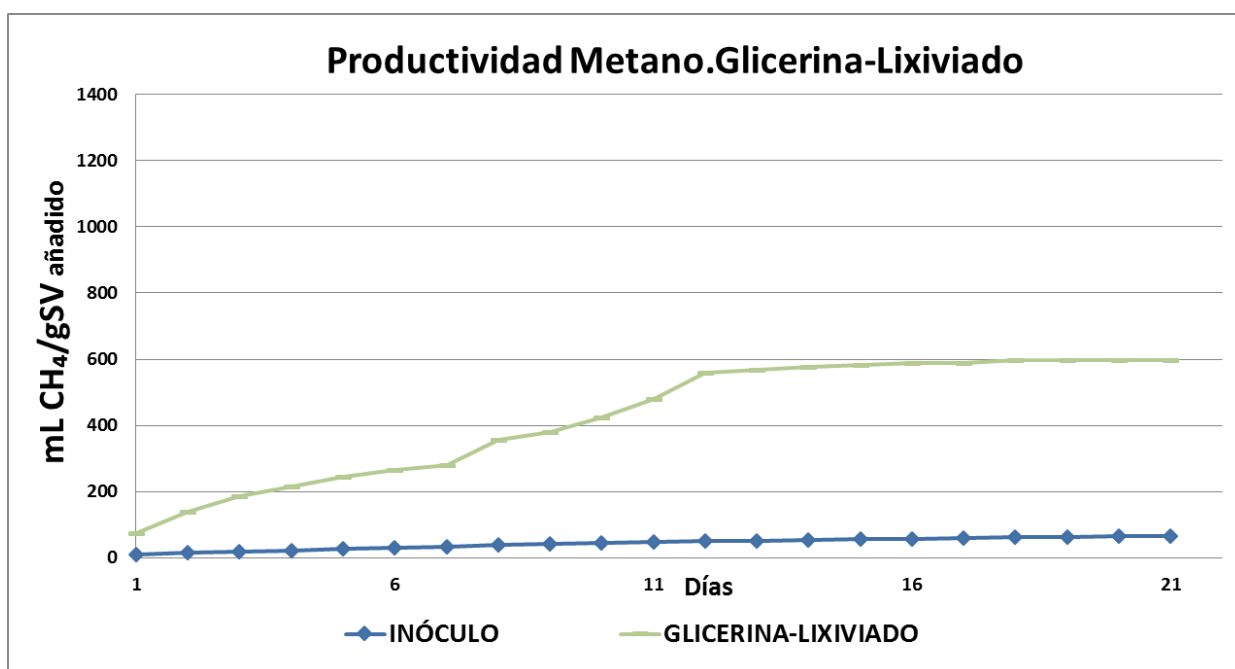


Gráfica 149. Producción Biogás Glicerina-Lixiviado, Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

### 5.3.7.2. Productividad de Metano

En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de glicerina y lixiviado, de las distintas fases temporales.

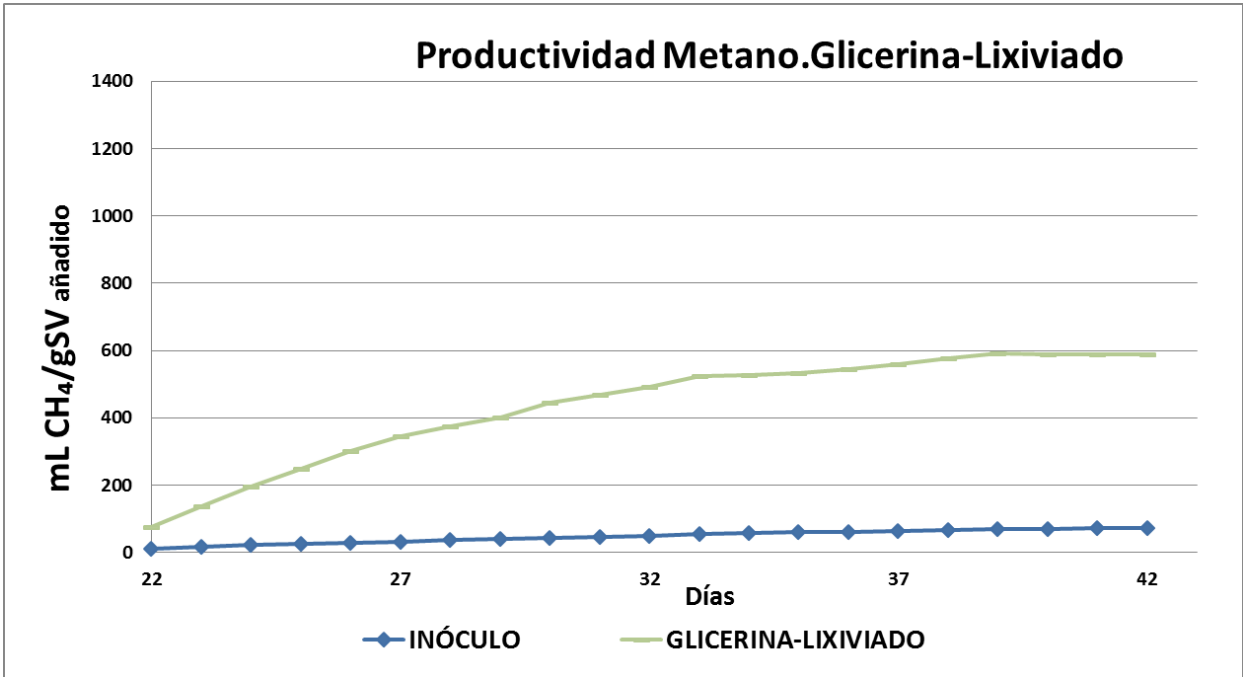
En la **fase 1**, el ensayo de digestión anaerobia de la mezcla de glicerina y lixiviado presenta una productividad de 559 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, como se observa en la gráfica 150, significativamente superior al inóculo



Gráfica 150. Productividad Metano Glicerina-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

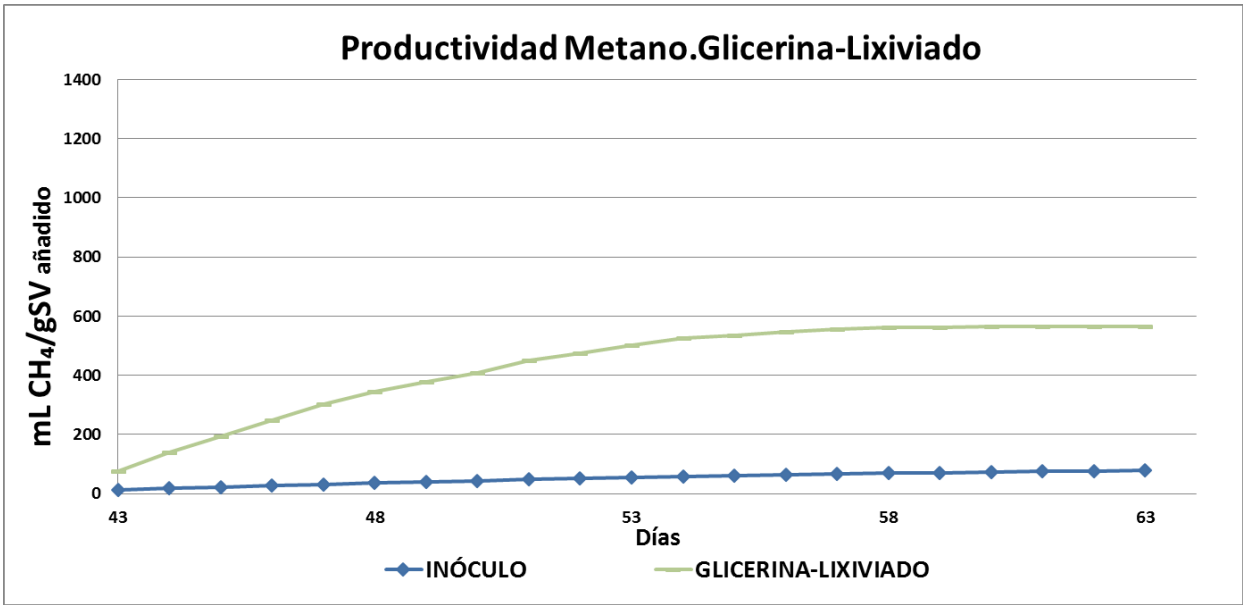


La productividad de metano en la **fase 2**, el ensayo de la mezcla de glicerina y lixiviado presenta una productividad de 588mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, como se observa en la gráfica 151.



Gráfica 151. Productividad Metano Glicerina-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

Tal y como se representa en la gráfica 152 que corresponde con la **fase 3**. El ensayo de la mezcla de Glicerina-Lixiviado presenta una productividad de 566 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 152. Productividad Metano Glicerina-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

#### **5.3.7.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es similar en todas las fases, aumentando de manera minima en la última fase. En la primera y segunda fase la mezcla de glicerina y lixiviado presenta un porcentaje de metano de un 63%, aumentando en un 8% con respecto al inóculo (55%). Y en la última fase el porcentaje de metano es de un 63%, aumentando en un 8% con respecto al inóculo (55%).

A la vista de los resultados, la adición de la mezcla de glicerina y lixiviado en una digestión anaerobia ha conducido a un incremento en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al inóculo.

### **5.3.8. Comparación de la digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos.**

#### **5.3.8.1. Comparación de la digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. Fase 1 (21 Días)**

Como se desprende de la discusión del capítulo anterior (ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y residuos orgánicos), es necesario buscar sustratos que enmienden el comportamiento de ciertos residuos difícilmente degradables en co-digestión. Por ello, se estudia una mezcla de residuos, en el que se ensaya su capacidad de mejorar los resultados de obtención de biogás y eliminación de materia orgánica, primeramente en digestión anaerobia.

**La producción de biogás** correspondientes a los ensayos de digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos, respecto a la fase 1, se han representado en la gráfica 153.

El suero se ha empleado como sustrato para mejorar el comportamiento de los residuos que son difícilmente biodegradable, también se ha utilizado para otros residuos.

Se puede observar claramente, que la mezcla SueroB-Alperujo es el que presenta mayor producción de biogás 1.147 mL. La aguas de glicerina junto con el suero genera 594 mL, un poco menos genera el lixiviado junto con el suero (525 mL). La adición del suero a los residuos inestables mejora la producción de biogás.

La mezcla de dos residuos de difícil tratabilidad como son el lixiviado y las aguas de glicerina tiene una producción de biogás de 618 mL, siendo una vía muy prometedora para gestionar dos residuos de difícil gestión.

Para afrontar la realidad diaria de una fábrica de aceite de oliva, se mezcla los residuos que se generan Alperujo-Alpechín, esta mezcla presenta una producción de biogás de 1.078 mL.

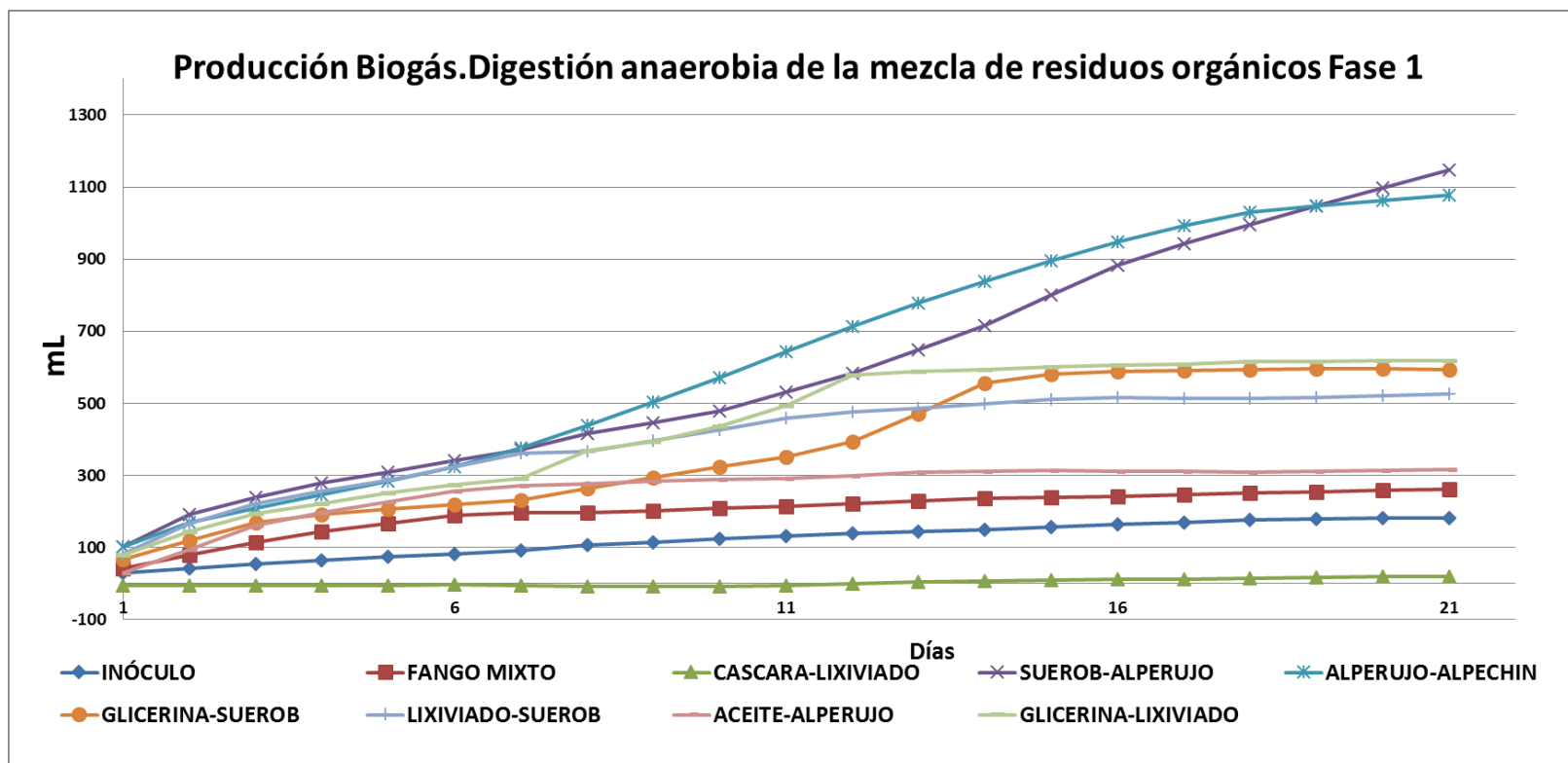
La mezcla del Aceite-Alperujo presenta una producción de biogás total de (316 mL), en el caso del fango mixto (261 mL) Todos los residuos anteriores producen más que el inóculo (182 mL) sin embargo la mezcla de cascara de arroz y lixiviado está por debajo, con tan solo 19 mL.

Con respecto al porcentaje de **eliminación de materia orgánica**, como se puede observar en la tabla 82, todas las mezclas residuos presentan una eliminación de DQO por encima

del inóculo, siendo muy significativo el porcentaje de eliminación del SueroB-Alperujo (70%), del mismo modo la adición del suero a la glicerina y lixiviado mejora la eliminación de materia orgánica (67% y 66%), respectivamente.

En términos de **eliminación de sólidos**, cabe destacar el poco porcentaje de eliminación de sólidos totales de la mezcla Glicerina-SueroB (23%). Por el contrario, el Alperujo-Alpechín es la mezcla de residuos que presenta un mayor porcentaje de eliminación de ST (55%), así como un mayor porcentaje de eliminación de SV (42%).

..



Gráfica 153. Producción Biogás. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

Tabla 82. Porcentaje Eliminación y Producción de Biogás. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

		Inóculo	Fango Mixto	Cascara-Lixiviado	SueroB-Alperujo	Alperujo-Alpechín	Glicerina-SueroB	Lixiviado-SueroB	Aceite-Alperujo	Glicerina-Lixiviado
<b>DQO</b>	%	28	59	34	70	69	67	66	56	56
<b>ST</b>	%	26	34	27	32	42	23	25	33	28
<b>SV</b>	%	21	32	49	49	55	35	32	33	33
<b>P de Biogás</b>	mL	182	261	19	1147	1078	594	525	316	618

### **5.3.8.2. Comparación de la digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. Fase2 (42 Días)**

Como se desprende de la discusión del capítulo anterior (ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y residuos orgánico), es necesario buscar sustratos que enmienden el comportamiento de ciertos residuos difícilmente degradables en co-digestión. Por ello, se estudia una mezcla de residuos, en el que se ensaya su capacidad de mejorar los resultados de obtención de biogás y eliminación de materia orgánica, primeramente en digestión anaerobia.

**La producción de biogás** correspondientes a los ensayos de digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos, respecto a la fase 2 con fango adaptado a la mezcla residuos procedentes de la fase 1, se han representado en la gráfica 154.

El suero se ha empleado como sustrato para mejorar el comportamiento de los residuos que son difícilmente biodegradable, también se ha utilizado para otros residuos.

Se puede observar claramente, que la mezcla SueroB-Alperujo es el que presenta mayor producción de biogás 1.265 mL. La aguas de glicerina junto con el suero genera 615 mL, un poco menos genera el lixiviado junto con el suero (575 mL). La adición del suero a los residuos inestables mejora la producción de biogás.

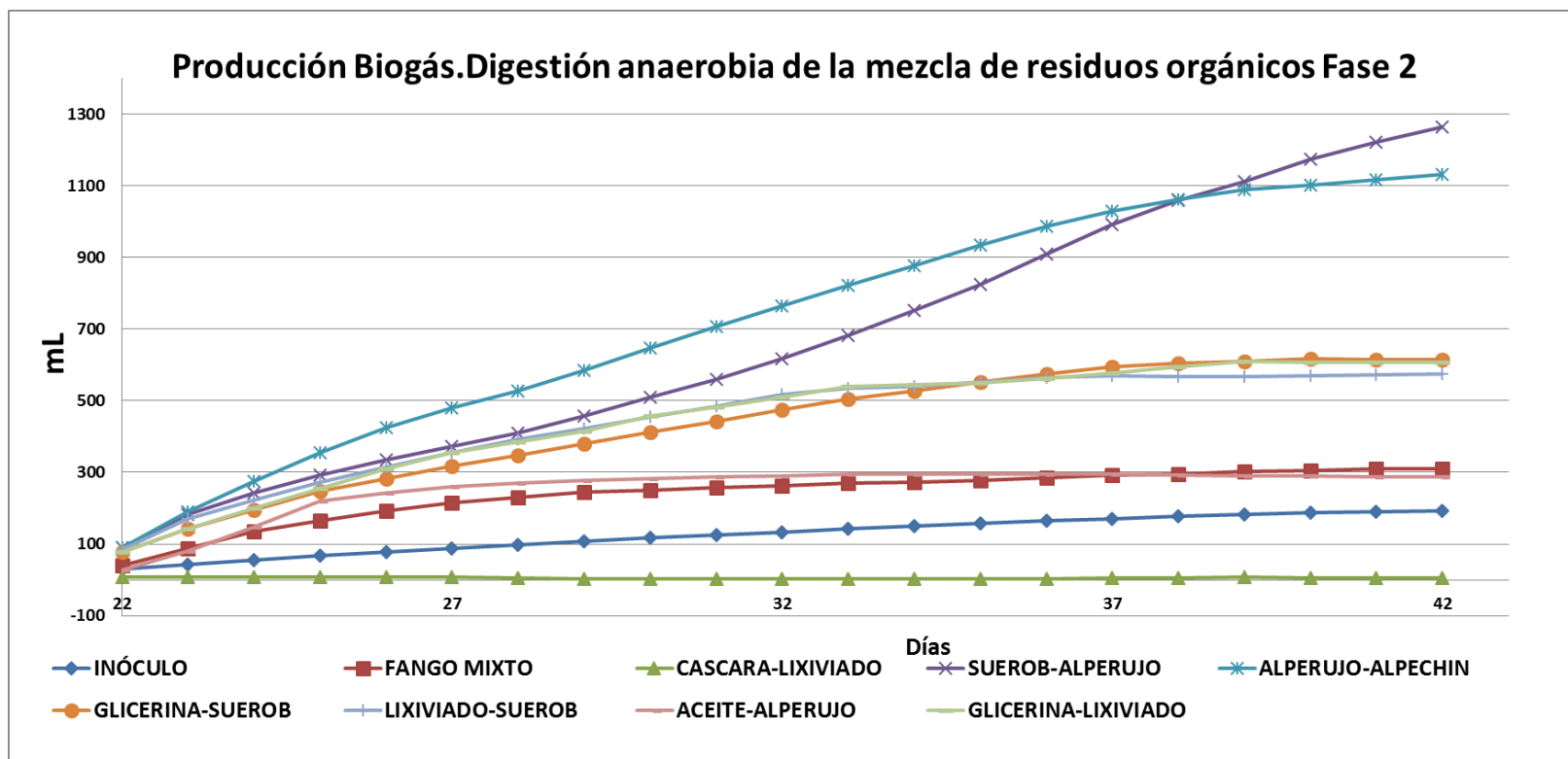
La mezcla de dos residuos inestables como son el lixiviado y las aguas de glicerina tiene una producción de biogás de 607 mL, siendo una vía muy prometedora para gestionar dos residuos de difícil gestión.

Para afrontar la realidad diaria de una fábrica de aceite de oliva, se mezcla los residuos que se generan Alperujo-Alpechín, esta mezcla presenta una producción de biogás de 1.130mL.

El fango mixto genera 309 mL, con una producción inferior esta la mezcla de Aceite-Alperujo, que genera 287 mL. Todos los residuos anteriores producen más que el inóculo (193mL) sin embargo la mezcla de cascara de arroz y lixiviado está por debajo, con tan solo 5 mL.

Con respecto al porcentaje de **eliminación de materia orgánica**, como se puede observar en la tabla 83, todas las mezclas residuos presentan una eliminación de DQO por encima del inóculo, siendo muy significativo el porcentaje de eliminación del SueroB-Alperujo (60%).

En términos de **eliminación de sólidos**, cabe destacar el poco porcentaje de eliminación de sólidos volátiles de la mezcla Glicerina-Lixiviado (20%), así como en sólidos totales (24%) Por el contrario, el Alperujo-Alpechín es la mezcla de residuos que presenta un mayor porcentaje de eliminación de SV (53%).



Gráfica 154. Producción Biogás. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

Tabla 83. Porcentaje Eliminación y Producción de Biogás. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

		Inóculo	Fango Mixto	Cascara-Lixiviado	SueroB-Alperujo	Alperujo-Alpechín	Glicerina-SueroB	Lixiviado-SueroB	Aceite-Alperujo	Glicerina-Lixiviado
<b>DQO</b>	%	19	51	37	60	54	45	50	51	39
<b>ST</b>	%	27	34	28	25	35	24	25	34	24
<b>SV</b>	%	26	34	30	43	53	40	47	40	20
<b>P de Biogás</b>	mL	193	309	5	1265	1130	615	575	287	607



### 5.3.8.3. Comparación de la digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. Fase 3 (63 Días)

Como se desprende de la discusión del capítulo anterior (ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto y residuos orgánico), es necesario buscar sustratos que enmienden el comportamiento de ciertos residuos difícilmente degradables en co-digestión. Por ello, se estudia una mezcla de residuos, en el que se ensaya su capacidad de mejorar los resultados de obtención de biogás y eliminación de materia orgánica, primeramente en digestión anaerobia.

**La producción de biogás** correspondientes a los ensayos de digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos, respecto a la fase 2 con fango adaptado a la mezcla residuos procedentes de la fase 1, se han representado en la gráfica 155.

El suero se ha empleado como sustrato para mejorar el comportamiento de los residuos que son difícilmente biodegradable, también se ha utilizado para otros residuos.

Se puede observar claramente, que la mezcla SueroB-Alperujo es el que presenta mayor producción de biogás 1.288 mL. La aguas de glicerina junto con el suero genera 621 mL, un poco menos genera el lixiviado junto con el suero (516 mL). La adición del suero a los residuos inestables mejora la producción de biogás.

La mezcla de dos residuos inestables como son el lixiviado y las aguas de glicerina tiene una producción de biogás de 584 mL, siendo una vía muy prometedora para gestionar dos residuos de difícil gestión.

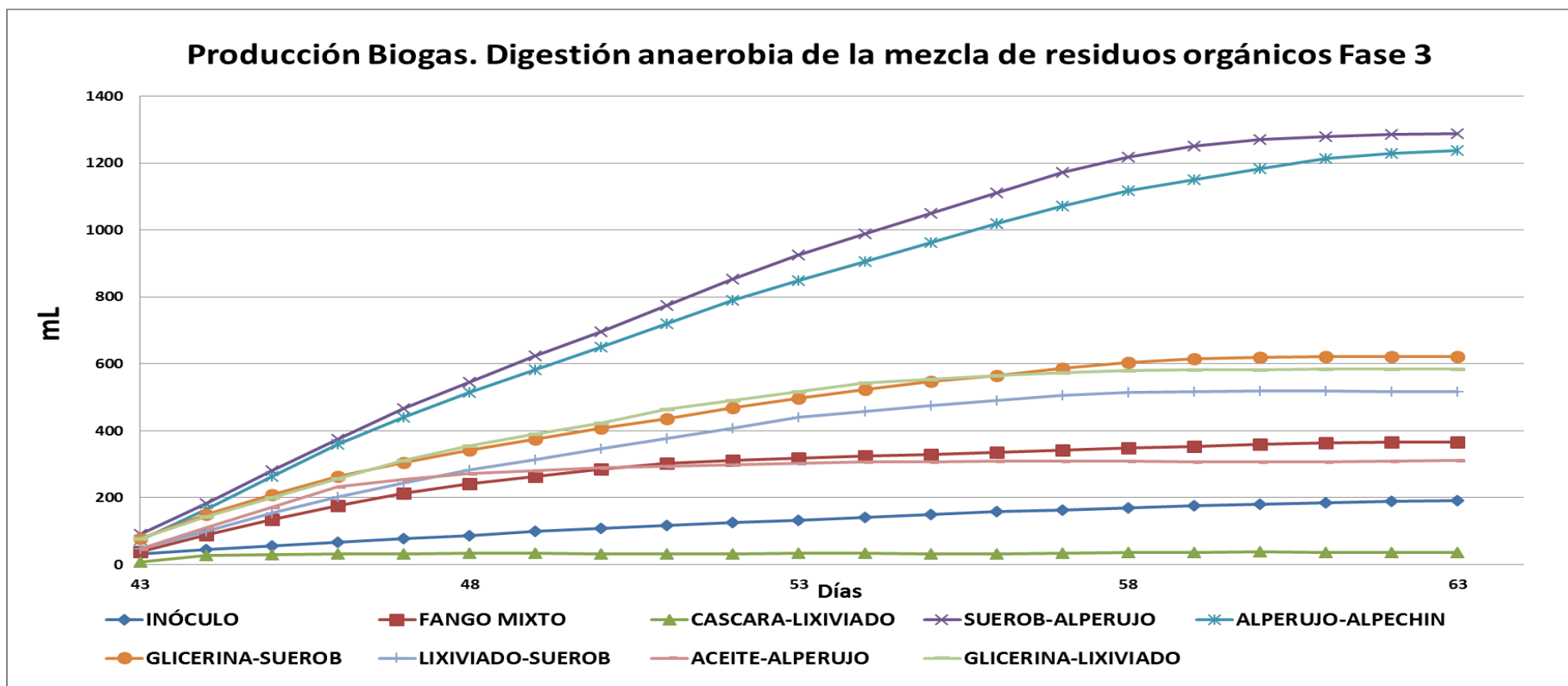
Para afrontar la realidad diaria de una fábrica de aceite de oliva, se mezcla los residuos que se generan Alperujo-Alpechín, esta mezcla presenta una producción de biogás de 1.237mL.

El fango mixto genera 367 mL, por debajo esta la producción del Aceite-Alperujo, que genera 310 mL. Todos los residuos anteriores producen más que el inóculo (191mL) sin embargo la mezcla de cascara de arroz y lixiviado está por debajo, con tan solo 36 mL.

En cuanto al porcentaje de **eliminación de materia orgánica**, como se puede observar en la tabla 84, todos los residuos presentan una eliminación de DQO por encima del inóculo, siendo muy significativo el porcentaje de eliminación del SueroB-Alperujo y Alperujo-Alpechín con 55% y 56%, respectivamente.

Es importante mencionar, que la mezcla de suero y lixiviado presenta una eliminación del 51%- el porcentaje de eliminación de la mezcla de suero y glicerina es bajo, siendo de 41%. La mezcla de los dos residuos inestables tiene el porcentaje de eliminación de materia orgánica más bajo de todas las mezclas de residuos (40%).

Con respecto al porcentaje de **eliminación de sólidos**, cabe destacar el poco porcentaje de eliminación de sólidos totales de la mezcla Cascara-Lixiviado y Aceite-Alperujo, ambos con un (29%). Por el contrario, el Alperujo-Alpechín y Glicerina-Suero Bruto son las mezclas de residuos que presenta un mayor porcentaje de eliminación de SV (39%).

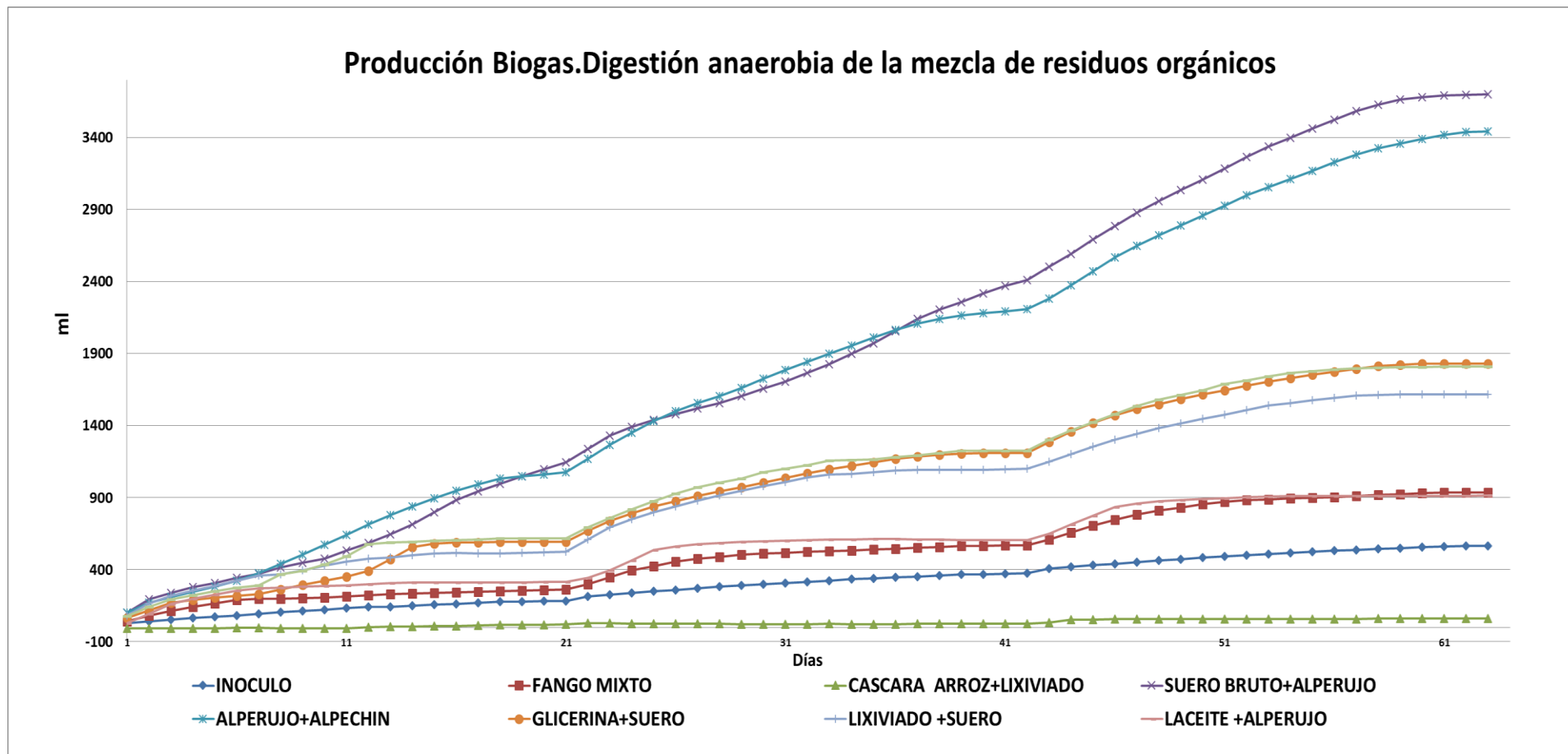


Gráfica 155. Producción Biogás. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

Tabla 84. Porcentaje Eliminación y Producción de Biogás. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

		Inóculo	Fango Mixto	Cascara-Lixiviado	SueroB-Alperujo	Alperujo-Alpechín	Glicerina-SueroB	Lixiviado-SueroB	Aceite-Alperujo	Glicerina-Lixiviado
DQO	%	15	51	44	55	56	41	51	50	40
ST	%	8	33	29	33	35	30	35	29	36
SV	%	23	37	32	38	39	39	38	35	31
P de Biogás	mL	191	367	36	1288	1237	621	516	310	584

#### 5.3.8.4. Comparación ensayo digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. Fase (1, 2 y 3)



Gráfica 156. Producción Biogás Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos

Tabla 85. Producción de Biogás. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos

<b>Producción Biogás</b>	<b>Inóculo</b>	<b>Fango Mixto</b>	<b>Cascara-Lixiviado</b>	<b>SueroB-Alperujo</b>	<b>Alperujo-Alpechín</b>	<b>Glicerina-SueroB</b>	<b>Lixiviado-SueroB</b>	<b>Aceite-Alperujo</b>	<b>Glicerina-Lixiviado</b>
<b>Fase 1</b>	182	261	19	1147	1078	594	525	316	618
<b>Fase 2</b>	193	309	5	1265	1130	615	575	287	607
<b>Fase 3</b>	191	367	36	1288	1237	621	516	310	584
<b>Producción Total</b>	566	937	60	3700	3445	1829	1617	914	1809

La adición de la mezcla cascara de arroz y lixiviado, presenta una producción de biogás inestable, debido a que el lixiviado es un residuo complejo y la cascara de arroz es difícil de biodegradar.

La mezcla del residuo procedente de la industria láctea, como sustrato que enmiende el comportamiento y la producción de biogás de residuos inestables. Como se puede observar en gráfica 156, La adición suero es muy viable.

La adición de la mezcla de suero y agua glicerosas, presenta una producción de biogás similar en todas las fases, aumentando en las dos últimas la producción, siendo la última la más productiva de todas. Del mismo modo, la mezcla de suero con el lixiviado presenta una producción de biogás similar en todas las fases, disminuyendo la complejidad del lixiviado. Además, la mezcla del suero con el alperujo presenta una producción de biogás en las tres fases temporales del ensayo muy significativa.

La mezcla de los residuos procedentes de la fabricación de aceite de oliva, alperujo y alpechín presenta una magnífica adaptación en una digestión anaerobia, aumentando la producción de biogás al transcurso de las fases del ensayo.

Las aguas glicerosas junto con el lixiviado en una digestión anaerobia, presenta un buen arranque en la producción de biogás. En las fases 2 y 3 la producción de biogás es similar, se confirma este buen comportamiento, que abre posibilidades inesperadas previamente de la mezcla de residuos poco biodegradables.

### **5.3.9. Conclusiones ensayo digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos.**

En general, la mezcla de residuos agroalimentarios e industriales son viables para su aprovechamiento energético y gestión de residuos, siendo una magnífica herramienta de trabajo.

La adición de suero a residuos de difícil tratamiento mejora la producción de biogás y su tratabilidad.

La mezcla de residuos de la industria de la fabricación de aceite de oliva en un solo residuo aumenta notoriamente la producción de biogás. La mezcla de residuos reduce la

problemática medioambiental del alpechín, siendo una buena posibilidad de tratamiento para las balsas de evaporación de las empresas del olivar.

Las aguas glicerosas junto con el lixiviado abre posibilidades inesperadas para la gestión de residuos de difícil tratamiento.

Tras los resultados obtenidos, es necesario ensayar las mezclas de residuos con fangos mixtos para ver la mejora de la gestión de residuos y la productividad de biogás en una EDAR, tal y como se refleja en el ensayo siguiente.

#### **5.4. Ensayo de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica**

Con el fin de determinar la viabilidad de la mezcla varios residuos, en ensayos de Co-digestión anaerobia y estudiar la producción de biogás y metano y, la biodegradabilidad. Se ha estudiado la complementariedad de la mezcla residuos con lodo de depuradora, se han realizado test de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica. En todos los casos se han utilizado las mismas condiciones experimentales.

- Ensayo de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de cascara arroz y lixiviado
- Ensayo de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de suero bruto y alperujo
- Ensayo de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de alperujo y alpechín
- Ensayo de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de aguas de glicerina y suero bruto
- Ensayo de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de lixiviado y suero bruto
- Ensayo de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de aceite usado de cocina y alperujo
- Ensayo de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de aguas de glicerina y lixiviado

#### **Residuos**

De las tablas 140-142 del anexo IV, se muestran los resultados de las analíticas de laboratorio llevadas a cabo con el fin de determinar las características de los residuos empleados en este trabajo. Con respecto a las analíticas, se ha seguido la metodología descrita en el apartado 4. Como se recoge en dicha tabla, los residuos utilizados poseen unas características significativamente diferentes puesto que existe cierta variabilidad entre los resultados analíticos obtenidos para cada uno de ellos.



## **Inóculo**

Para realizar el ensayo BMP, se utilizó como fuente de biomasa metanogénica activa fango digerido extraído de los digestores de la EDAR que trata las aguas residuales urbanas de la comarca sur de Sevilla. Su composición se muestra en la tabla 143, anexo IV.

Para las fases 2 y 3 se ha utilizado como inóculo fango adaptado procedentes de los ensayos BMP de las fase anterior. Las características analíticas se muestran en la tabla 144-145, anexo IV.

#### 5.4.1. Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de Cascara Arroz y Lixiviado

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de cascara arroz y lixiviado. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1**, los resultados analíticos se muestran en la tabla 86, se observa que la mezcla del fango mixto con la cascara de arroz y el lixiviado presenta una eliminación de DQO del 48%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 32% y, el de sólidos volátiles presenta una eliminación del 26%. El pH no varía durante los 21 días del ensayo. Cabe destacar que la alcalinidad presenta un incremento a la salida del ensayo hasta un  $6.200,71 \pm 0,02 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$  y, un aumento de la materia volátil.

Tabla 86. Ensayo FM-Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

Fango Mixto-Cascara Arroz-Lixiviado

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$21.677,04 \pm 0,75$	$11.244,50 \pm 0,78$	48
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$18.220,41 \pm 0,80$	$12.320,36 \pm 0,84$	32
Materia Seca	%	1,82	1,23	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$11.230,41 \pm 0,84$	$8.310,38 \pm 0,89$	26
Materia Volátil	%	61,64	67,45	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,00 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,28 \pm 0,02$	$12,20 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$2.400,65 \pm 1,02$	$6.200,71 \pm 1,08$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$408,10 \pm 1,03$	$525,06 \pm 0,99$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$489,72 \pm 1,03$	$630,19 \pm 0,99$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,17	0,08	

En la tabla 87 que corresponde con la **fase 2** del ensayo, se observa que el fango mixto con la mezcla de cascara de arroz y lixiviado presenta una eliminación de materia orgánica del 46%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 31%. En cambio, el porcentaje de eliminación de sólidos volátiles disminuye hasta un 25%. El pH no varía durante los 21 días del ensayo. Cabe destacar, que el porcentaje de materia volátil aumenta hasta un 86.62%.

Tabla 87. Ensayo FM-Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

#### Fango Mixto-Cascara Arroz-Lixiviado

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	23.740,55 ±0,70	12.878,42 ±0,77	46
ST	mg L <sup>-1</sup>	19.540,12 ±0,81	13.450,11 ±0,86	31
Materia Seca	%	1,95	1,35	
SV	mg L <sup>-1</sup>	15.478,23 ±0,85	11.650,63 ±0,89	25
Materia Volátil	%	79,21	86,62	
pH		7,00 ±0,01	7,00 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	12,28 ±0,02	12,20 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	2.650,84 ±1,02	3.450,74 ±1,06	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	415,44 ±0,91	290,23 ±1,02	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	498,63 ±0,91	331,43 ±1,02	
Relación AGV/Alcalinidad		0,16	0,08	

En la **fase 3**, se observa que el ensayo del fango mixto con la mezcla de cascara de arroz y lixiviado presenta una eliminación de materia orgánica del 45%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 30%. En cambio, el porcentaje de eliminación de sólidos volátiles disminuye hasta un 28%. El pH no varía durante los días del ensayo. Cabe destacar que, el incremento en la alcalinidad hasta un  $6.475,56 \pm 1,03 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ .<sup>1</sup>. Tal y como se muestra en la tabla 88.

Tabla 88. Ensayo FM-Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

#### Fango Mixto-Cascara Arroz-Lixiviado

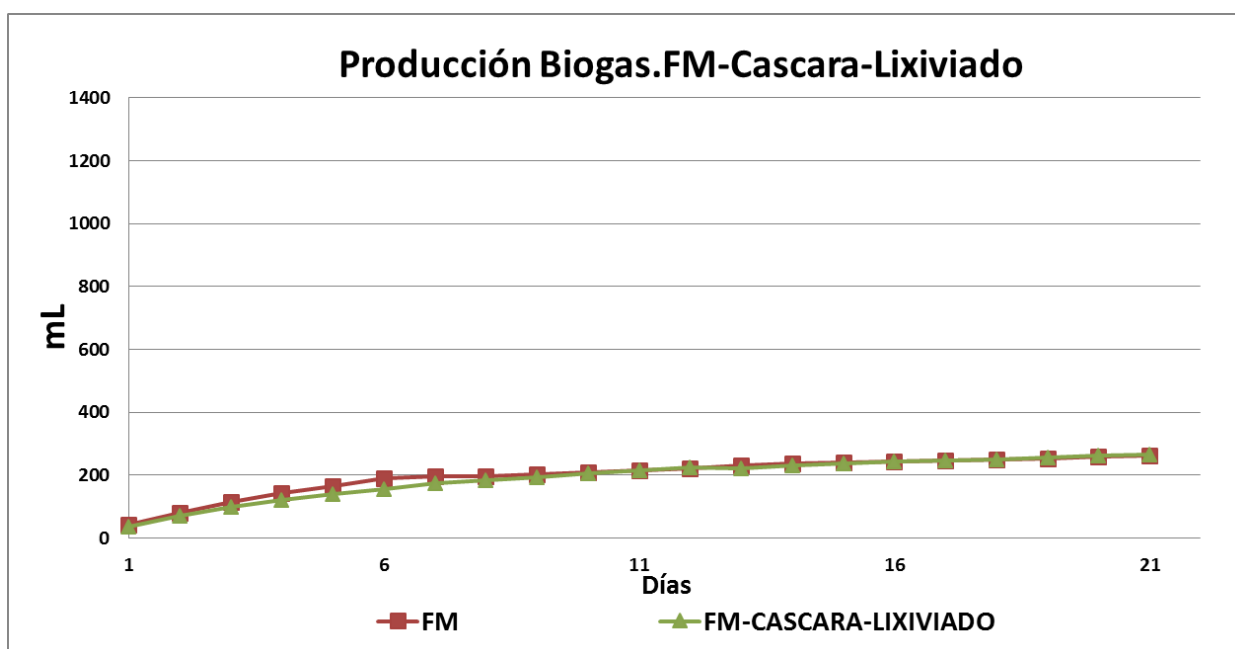
Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$21.456,11 \pm 0,74$	$11.720,12 \pm 0,75$	45
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$19.456,45 \pm 0,85$	$13.560,82 \pm 0,90$	30
Materia Seca	%	1,95	1,36	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$15.320,22 \pm 0,83$	$10.975,66 \pm 0,84$	28
Materia Volátil	%	78,74	80,94	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,00 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,28 \pm 0,02$	$12,20 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$2.650,33 \pm 1,05$	$6.475,56 \pm 1,03$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$409,96 \pm 0,92$	$540,44 \pm 1,02$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$490,88 \pm 0,92$	$648,22 \pm 1,02$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,15	0,08	

#### 5.4.1.1. Producción de Biogás

En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de cascara arroz y lixiviado. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de fangos mixtos de EDAR con mezcla de cascara arroz y lixiviado.

Como se representa en la gráfica 157 que corresponde con la **fase 1**, la adición del fango mixto con la mezcla de cascara de arroz y lixiviado, no aumenta la producción de biogás, presentando un crecimiento similar al fango mixto.

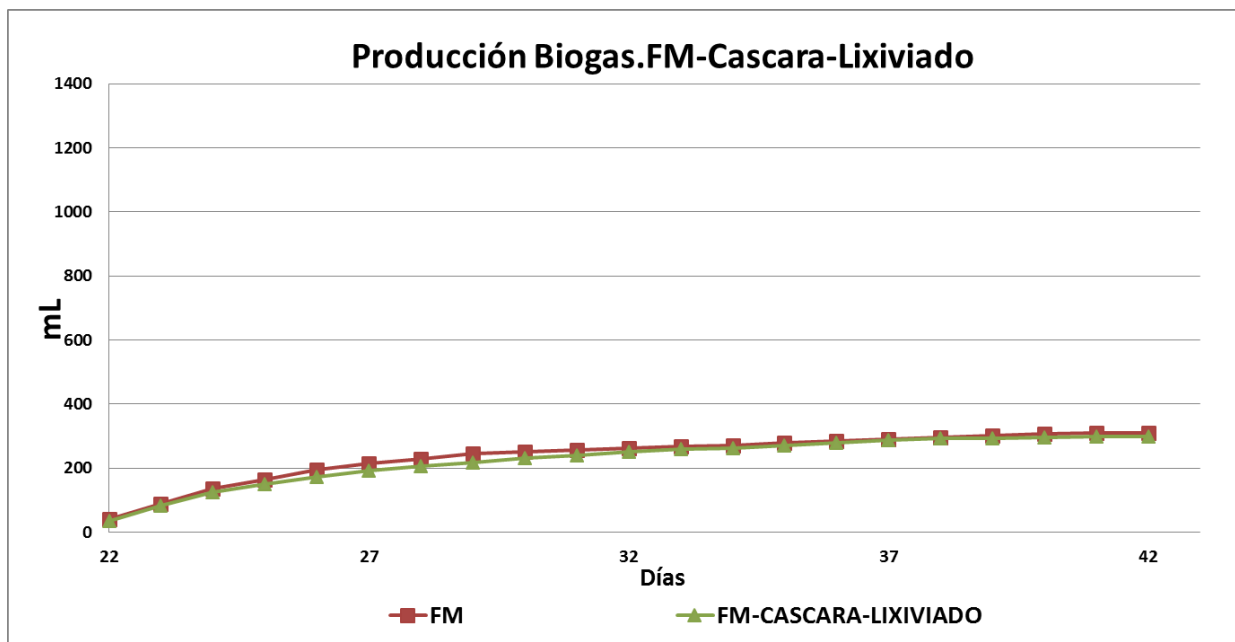
El fango mixto (261 mL) produce 5 mL de biogás más que el ensayo de FM-Cascara-Lixiviado que tan solo produce 266 mL



Gráfica 157. Producción Biogás FM-Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

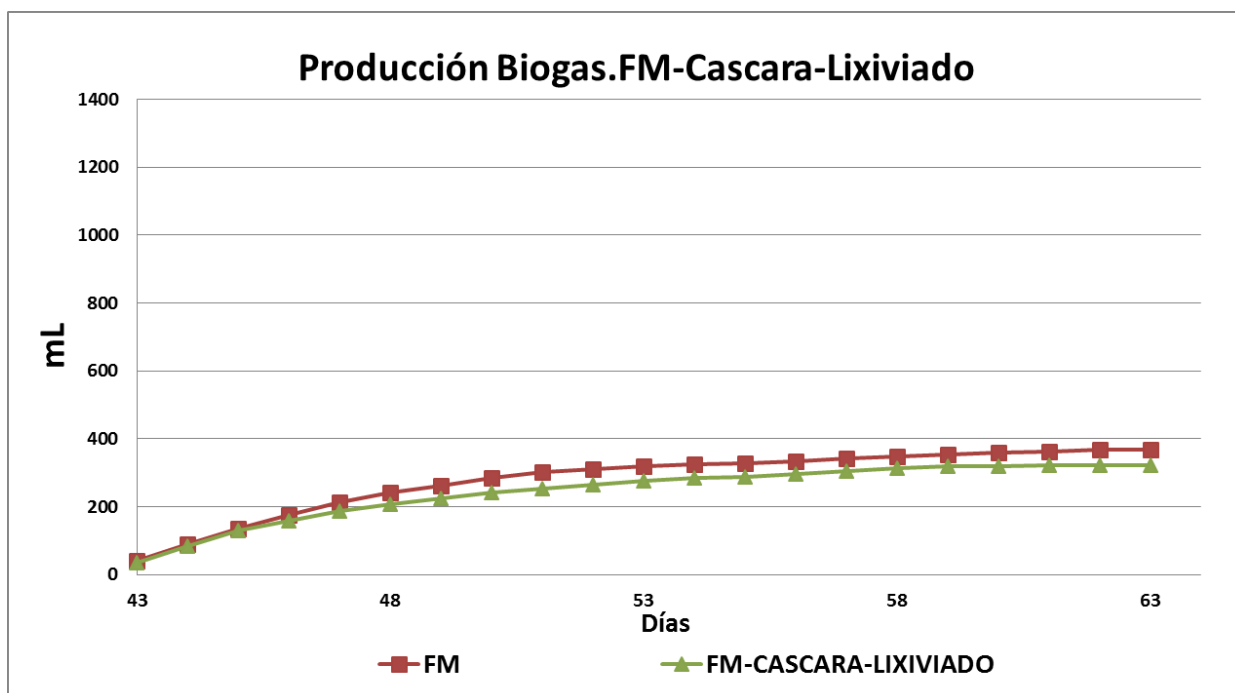
En la **fase 2** como se representa en la gráfica 158, el ensayo FM-Cascara-Lixiviado no aumenta la producción de biogás, presentando un crecimiento similar al fango mixto.

El fango mixto (309 mL) produce 11 mL de biogás más que FM-Cascara-Lixiviado que tan solo produce 298 mL.



Gráfica 158. Producción Biogás FM-Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

Como se representa en la gráfica 159, respecto a la **fase 3**. El ensayo de fango mixto con la mezcla de cascara de arroz y lixiviado no aumenta la producción de biogás, presentando un crecimiento similar al fango mixto. El fango mixto (367 mL) produce 44 mL de biogás más que el ensayo FM-Cascara-Lixiviado que tan solo produce 323 mL.

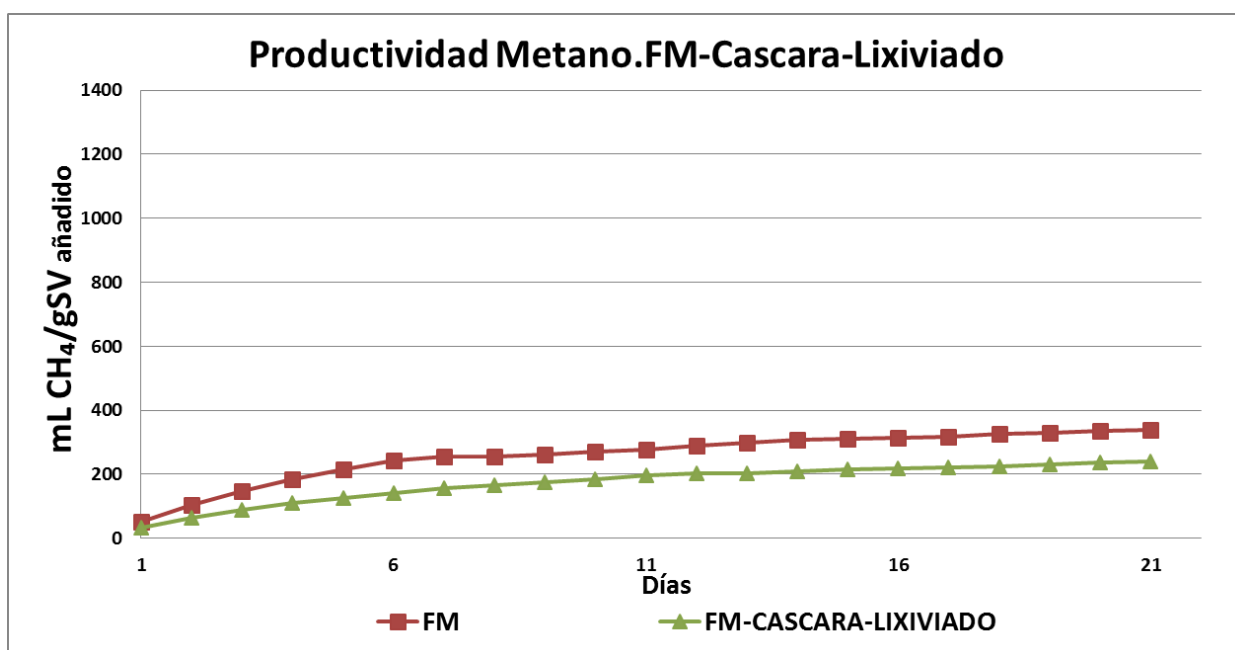


Gráfica 159. Producción Biogás FM-Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

#### 5.4.1.2. Productividad de Metano

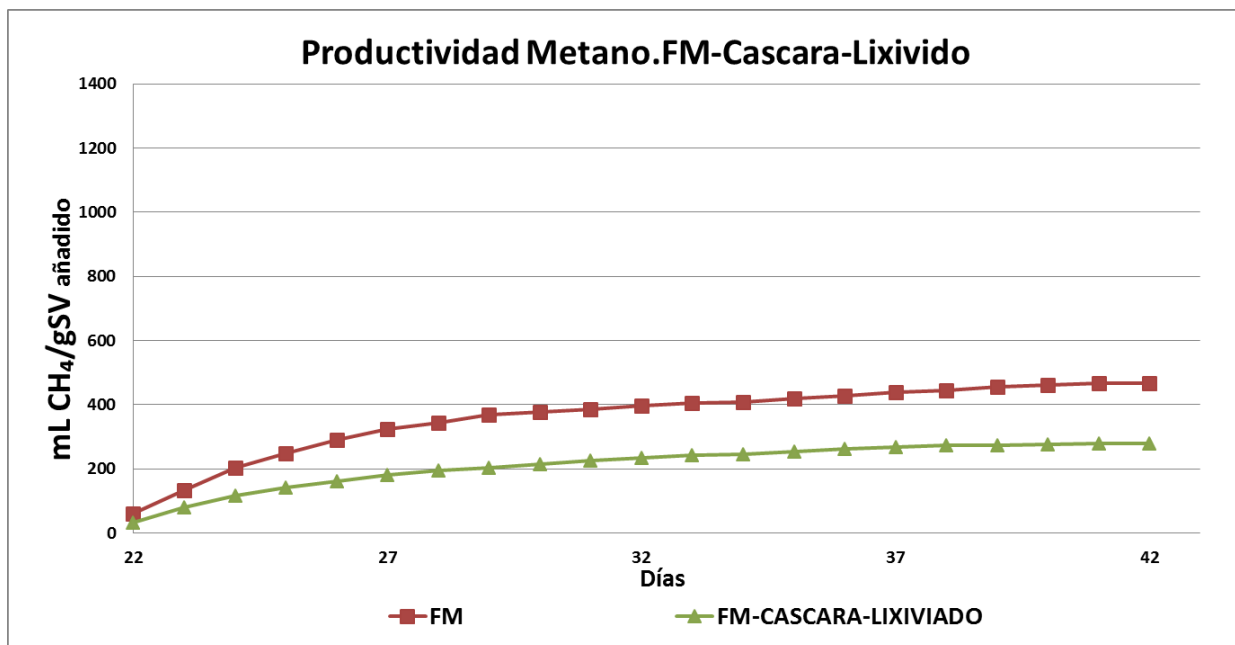
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de cascara arroz y lixiviado, de las distintas fases temporales.

Con respecto a la productividad de metano de la **fase 1**, el ensayo fango mixto produce un total de 338 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, siendo superior al ensayo de fango mixto con la mezcla de cascara y lixiviado que tan solo produce 241 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>. Tal y como se representa en la gráfica 160.



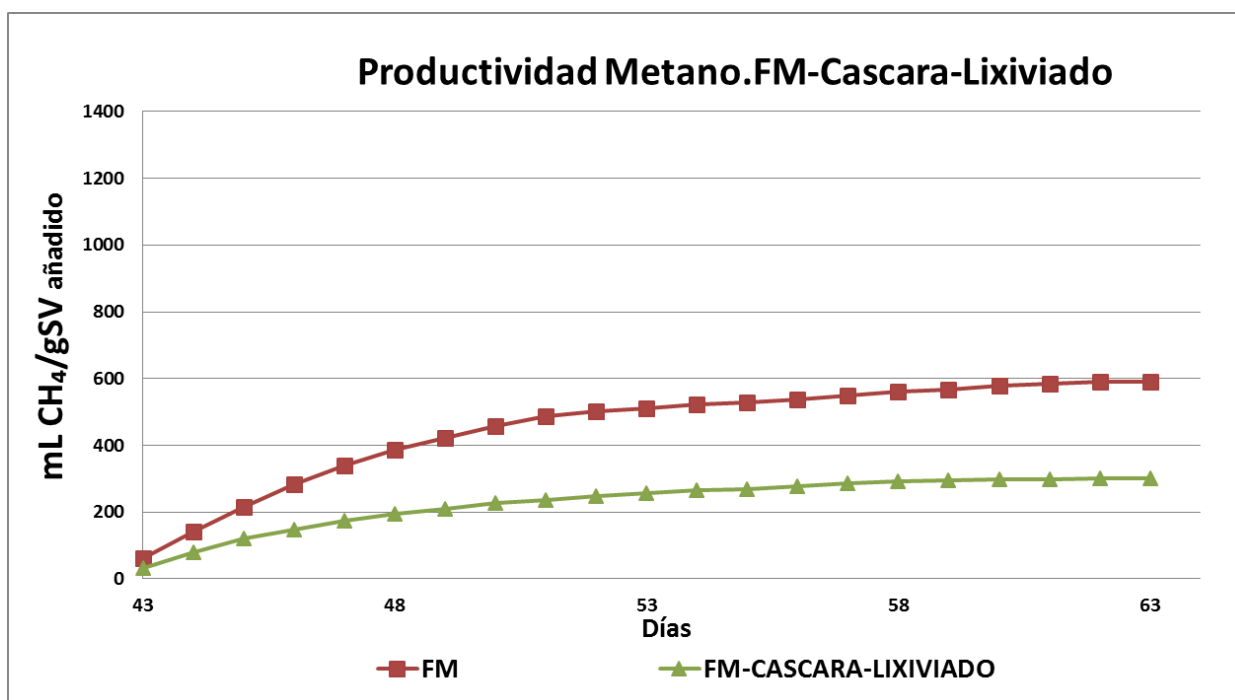
Gráfica 160. Productividad Metano FM-Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

Tal y como se representa en la gráfica 161, que corresponde con la productividad de metano del ensayo en la **fase 2**. El ensayo de fango mixto con la mezcla de cascara de arroz y lixiviado presenta una productividad total de metano de 278 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> siendo inferior al ensayo del fango mixto (466 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).



Gráfica 161. Productividad Metano FM-Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

Con respecto a la productividad de metano de la **fase 3**, el ensayo de fango mixto con la mezcla de cascara de arroz y lixiviado (FM-Cascara-Lixiviado) presenta una productividad de metano total de 301 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, como se observa en la gráfica 162, es inferior al ensayo del fango mixto (589 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).



Gráfica 162. Productividad Metano FM- Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3



#### **5.4.1.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. El porcentaje de metano en el ensayo FM-Cascara-Lixiviado es del 68%, un 2% menor, con respecto al ensayo del fango mixto (70%).

A la vista de los resultados, la adición de fangos mixtos de EDAR con mezcla de cascara arroz y lixiviado en una co-digestión anaerobia no ha conducido a un incremento en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al fango mixto debido a que son residuos de difícil tratamiento.

#### 5.4.2. Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de Suero B y Alperujo

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de suero bruto y alperujo. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1** (tabla 89), se observa que el ensayo de FM-SueroB-Alperujo presenta una eliminación de materia orgánica del 61%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es del 31%. Sin embargo, los sólidos volátiles presentan un porcentaje de eliminación superior, llegando al 55%. La relación AGV/ Alcalinidad, disminuye de un 0,19 a un 0,07. Cabe destacar, la reducción del porcentaje de materia volátil hasta un 49,02%. El pH y la conductividad no varían durante los días del ensayo.

Tabla 89. Ensayo FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

##### Fango Mixto-Suero Bruto-Alperujo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	25.788,01 ±0,74	9.975,85 ±0,79	61
ST	mg L <sup>-1</sup>	20.170,56 ±0,81	13.830,63 ±0,88	31
Materia Seca	%	2,02	1,38	
SV	mg L <sup>-1</sup>	14.930,41 ±0,85	6.780,20 ±0,90	55
Materia Volátil	%	74,02	49,02	
pH		7,00 ±0,01	7,10 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	17,57 ±0,02	17,50 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	5.200,01 ±1,05	6.136,12 ±1,00	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	965,52 ±0,96	424,48 ±1,03	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	1.158,62 ±0,96	509,30 ±1,03	
Relación AGV/Alcalinidad		0,19	0,07	

En la **fase 2**, como se observa en la tabla 90. El ensayo de FM-SueroB-Alperujo presenta una eliminación de materia orgánica del 55%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es del 39%. La relación AGV/ alcalinidad, disminuye de un 0.15 a un 0.07. Cabe destacar, la reducción del porcentaje de materia volátil hasta un 67,12%, tan solo un 0,52%. El pH no varía durante los días del ensayo.

Tabla 90. Ensayo FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

#### Fango Mixto-Suero Bruto-Alperujo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	26.780,11 ±0,74	11.980,01 ±0,78	55
ST	mg L <sup>-1</sup>	24.150,23 ±0,82	14.840,09 ±0,89	39
Materia Seca	%	2,42	1,48	
SV	mg L <sup>-1</sup>	16.480,62 ±0,90	10.050,78 ±0,83	39
Materia Volátil	%	68,24	67,72	
pH		7,00 ±0,01	7,10 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	17,57 ±0,02	17,50 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	5.250,33 ±1,00	6.120,85 ±1,05	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	800,42 ±0,90	425,96 ±0,95	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	965,41 ±0,90	510,55 ±0,95	
Relación AGV/Alcalinidad		0,15	0,07	

Los resultados de los análisis de la **fase 3**, se muestran en la tabla 91. Como se observa el ensayo de FM-SueroB-Alperujo presenta un DQO de entrada de  $24.056,11 \pm 0,70 \text{ mg L}^{-1}$  y, una DQO de salida de  $10.340,41 \pm 0,74 \text{ mg L}^{-1}$ , por lo que presenta una eliminación de materia orgánica del 57%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es del 39%. La relación AGV/alcalinidad, disminuye de un 0,19 a un 0,07. Cabe destacar, la reducción del porcentaje de materia volátil no varía. El pH no varía durante los días del ensayo.

Tabla 91. Ensayo FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

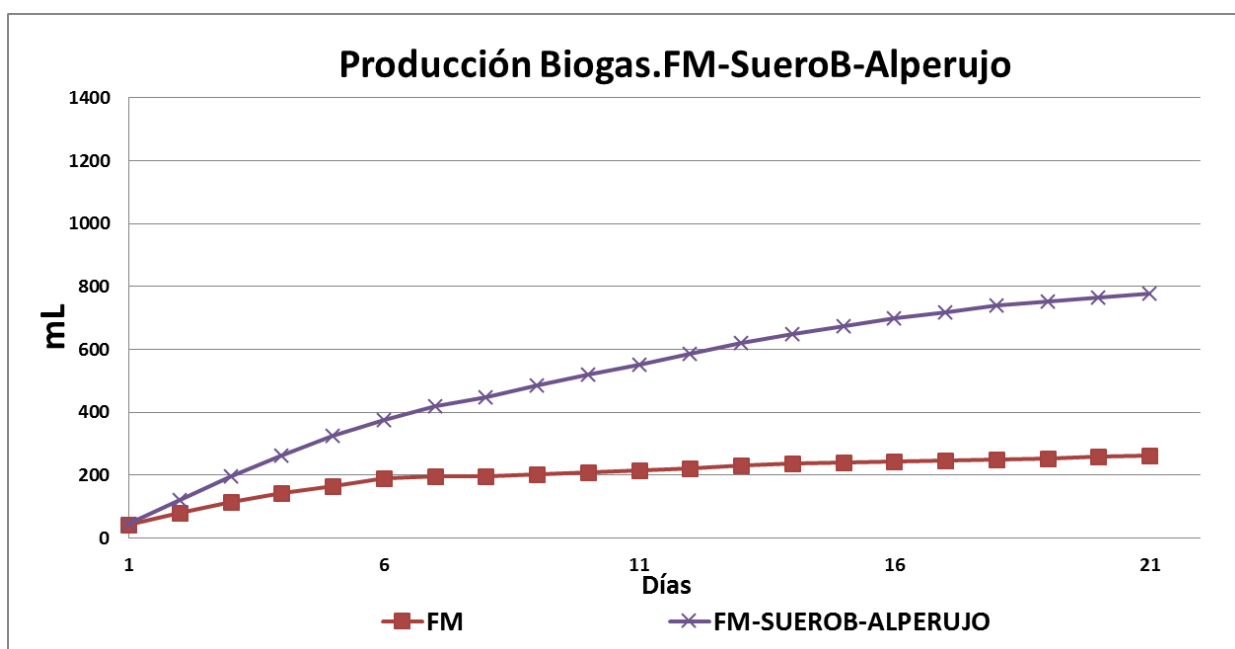
#### Fango Mixto-Suero Bruto-Alperujo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$24.056,11 \pm 0,70$	$10.340,41 \pm 0,74$	57
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$24.780,78 \pm 0,88$	$15.020,56 \pm 0,90$	39
Materia Seca	%	2,48	1,50	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$15.568,12 \pm 0,85$	$9.450,95 \pm 0,82$	39
Materia Volátil	%	62,82	62,92	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,10 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$17,57 \pm 0,02$	$17,50 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$5.340,03 \pm 1,04$	$6.346,55 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$1.000,18 \pm 0,99$	$425,41 \pm 1,02$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$1.200,11 \pm 0,99$	$510,12 \pm 1,02$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,19	0,07	

### 5.4.2.1. Producción de Biogás

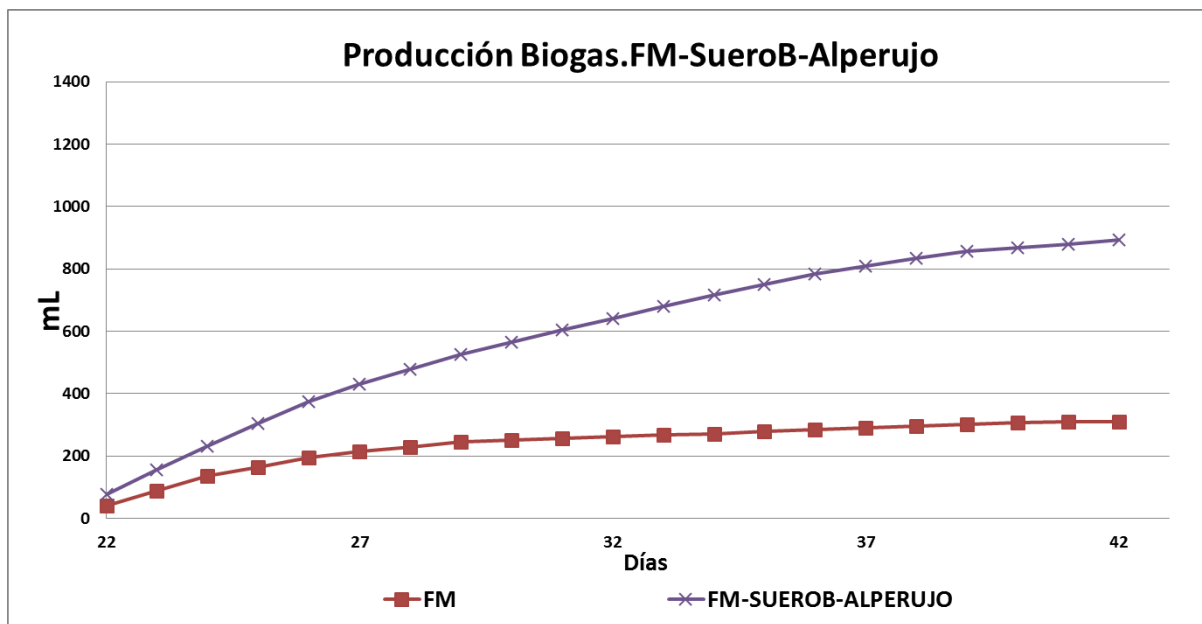
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de suero bruto y alperujo. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de fangos mixtos de EDAR con mezcla de suero bruto y alperujo.

En la **fase 1**, la producción de biogás, presenta un crecimiento exponencial hasta el día 18, en el cual se estabiliza, generando una producción total de biogás de 777 mL. Con respecto al ensayo del fango mixto (261mL), el ensayo de FM-SueroB-Alperujo (777 mL) incrementa la producción de biogás en 510 mL, tal y como se representa en la gráfica 163.



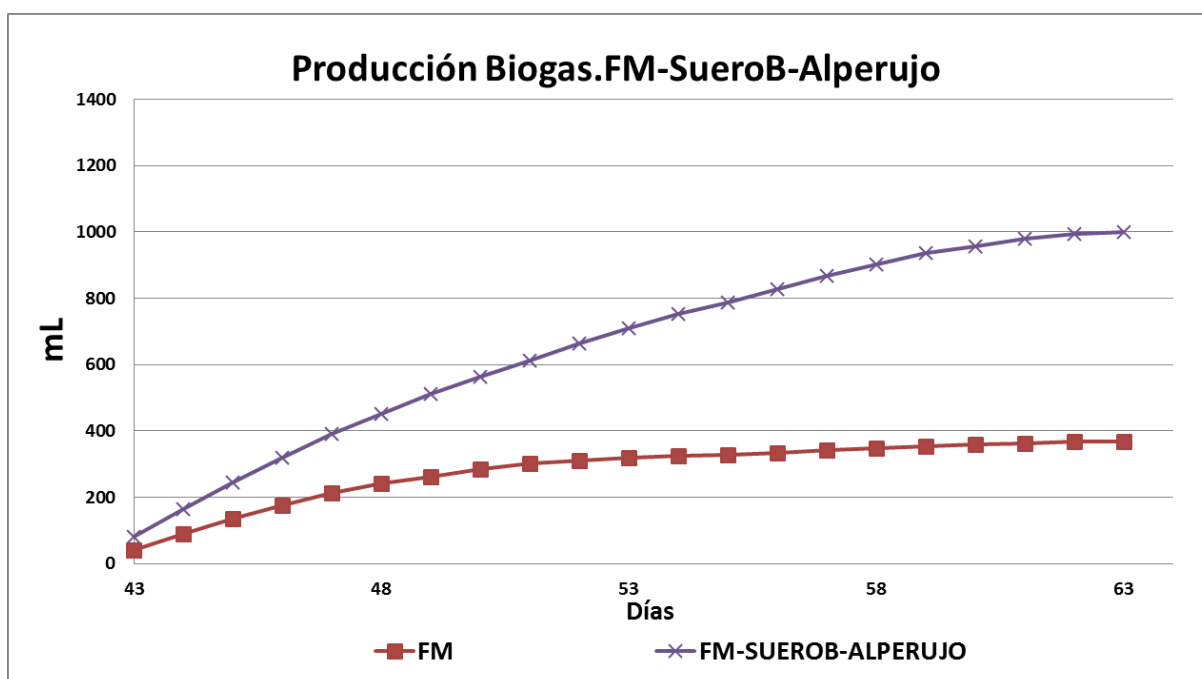
Gráfica 163. Producción Biogás FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

La producción de biogás en la **fase 2** del ensayo de fango mixto con mezcla de suero bruto y alperujo, presenta un crecimiento exponencial hasta el día 39, en el cual se estabiliza, generando una producción total de biogás de 893 mL. Con respecto al ensayo de fango mixto (309 mL), el ensayo de FM-SueroB-Alperujo (893 mL) incrementa la producción de biogás en 584 mL, tal y como se representa en la gráfica 164.



Gráfica 164. Producción Biogás FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

En la **fase 3**, la producción de biogás, presenta un crecimiento exponencial hasta el día 61, en el cual se estabiliza, generando una producción total de biogás de 1.001 mL. Con respecto al ensayo de fango mixto (367 mL) el ensayo de FM-SueroB-Alperujo (1.001 mL) incrementa la producción de biogás en 634 mL, tal y como se representa en la gráfica 165.

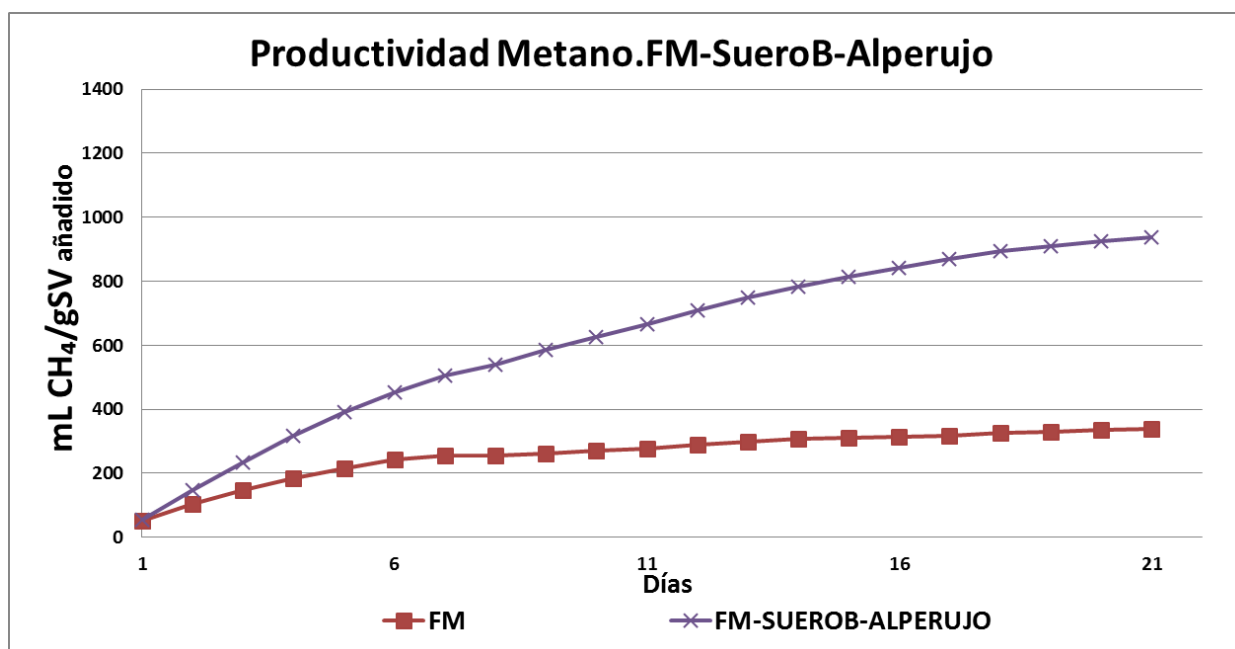


Gráfica 165. Producción Biogás FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

### 5.4.2.2. Productividad de Metano

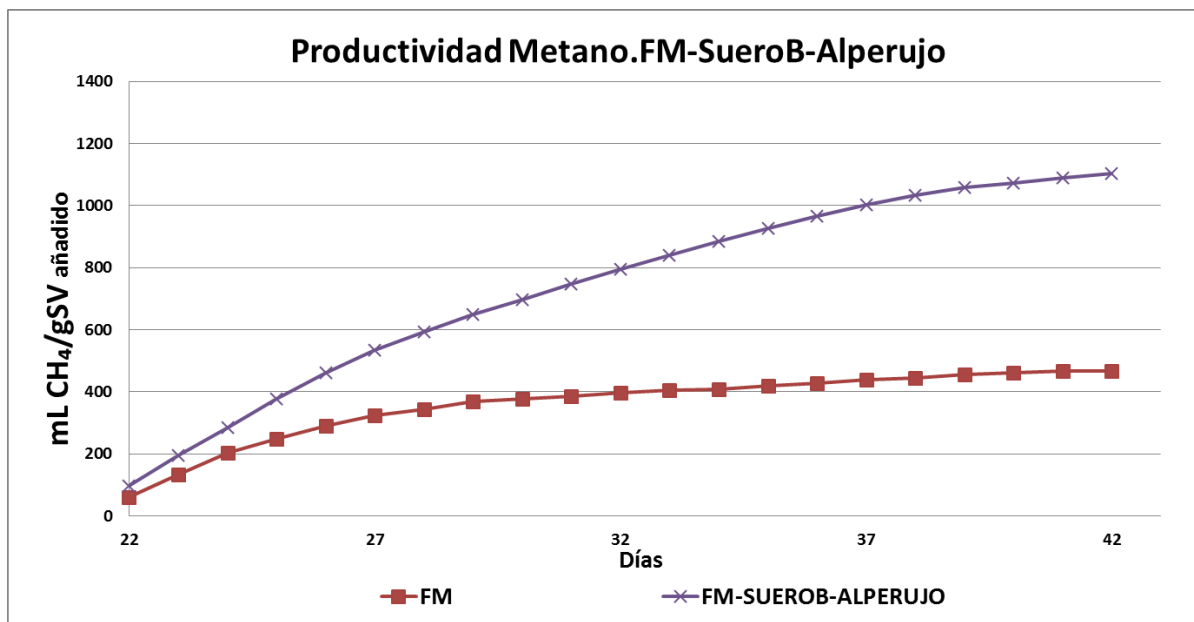
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de suero bruto y alperujo, de las distintas fases temporales.

Como se observa en la gráfica 166, que corresponde con la **fase 1**. La productividad de metano en el ensayo de FM-SueroB-Alperujo es de 801 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, superior al ensayo del fango mixto (338 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).



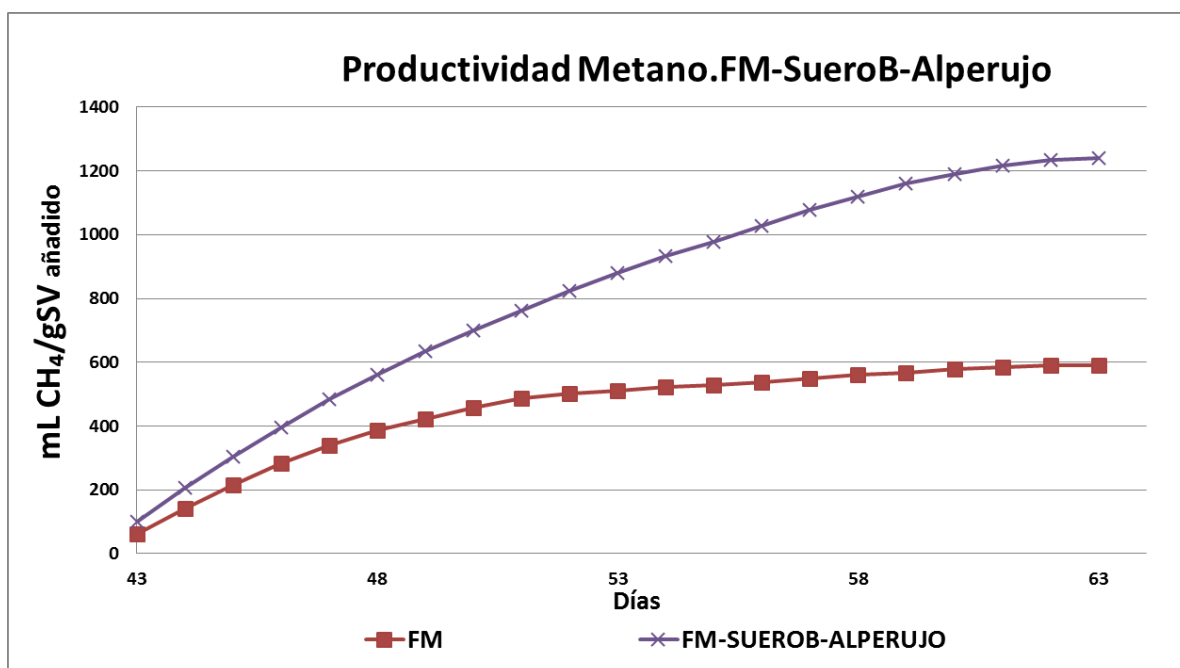
Gráfica 166. Productividad Metano FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

En la **fase 2**, la productividad de metano en el ensayo de FM-SueroB-Alperujo, 1.104 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, es superior a la del fango mixto (466 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>). Como se muestra en la gráfica 167.



Gráfica 167. Productividad Metano FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

En la **fase 3**(gráfica 168), como se muestra en la gráfica 168 (**fase 3**), la productividad de metano en el ensayo de FM-SueroB-Alperujo, 1.241mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, es superior al ensayo del fango mixto (589 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).



Gráfica 168. Productividad Metano FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3



#### **5.4.2.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. El ensayo de FM-SueroB-Alperujo presenta un porcentaje de metano en el biogás del 75%, un 5% superior al fango mixto (70%).

A la vista de los resultados, la adición de fangos mixtos de EDAR con mezcla de suero bruto y alperujo en una co-digestión anaerobia ha conducido a un incremento en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al fango mixto.

### 5.4.3. Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de Alperujo y Alpechín

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de alperujo y alpechín. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1** (tabla 92), se observa que el porcentaje de eliminación de materia orgánica en el caso del ensayo FM-Alperujo-Alpechín es del 60%. La eliminación de los sólidos tanto el total como el volátil, son iguales 39%. El pH final es de  $7,50 \pm 0,01$  y, la relación final AGV/ alcalinidad es 0,078. Cabe destacar, que la alcalinidad presenta un incremento a la salida hasta un  $6.600,45 \pm 1,05 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$  y, los AGV una disminución.

Tabla 92. Ensayo FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

#### Fango Mixto-Alperujo-Alpechín

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$24.730,13 \pm 0,73$	$9.852,67 \pm 0,78$	60
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$20.560,61 \pm 0,84$	$12.540,45 \pm 0,89$	39
Materia Seca	%	2,06	1,25	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$13.440,22 \pm 0,86$	$8.230,35 \pm 0,90$	39
Materia Volátil	%	65,37	65,63	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,50 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,00 \pm 0,02$	$12,10 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.100,87 \pm 1,07$	$6.600,45 \pm 1,05$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$720,34 \pm 0,95$	$551,72 \pm 1,02$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$864,41 \pm 0,95$	$662,07 \pm 1,02$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,23	0,08	

Como se observa en la tabla 93, que corresponde con la **fase 2** se puede observar que el porcentaje de eliminación de DQO en el caso del ensayo FM-Alperujo-Alpechín es del 57%, la eliminación de los sólidos tanto el total como el volátil, son similares 39% y 40% respectivamente. El pH final es de  $7,50 \pm 0,01$  y, la relación final AGV/ alcalinidad es 0,08. Cabe destacar, que la alcalinidad presenta un incremento a la salida hasta un  $6.600,41 \pm 1,08 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$  y, los AGV una disminución.

Tabla 93. Ensayo FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

#### Fango Mixto-Alperujo-Alpechín

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$26.840,22 \pm 0,71$	$11.645,11 \pm 0,77$	57
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$25.700,36 \pm 0,86$	$15.650,15 \pm 0,90$	39
Materia Seca	%	2,57	1,57	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$17.640,41 \pm 0,90$	$10.580,84 \pm 0,85$	40
Materia Volátil	%	68,64	67,60	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,50 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,00 \pm 0,02$	$12,10 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.240,63 \pm 1,02$	$6.600,41 \pm 1,08$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$740,41 \pm 1,00$	$553,38 \pm 0,95$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$841,95 \pm 1,00$	$664,40 \pm 0,95$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,23	0,08	

En la **fase 3**, como se muestra en la tabla 94. El porcentaje de eliminación de DQO en el caso del ensayo de FM-Alperujo-Alpechín es del 60%. La eliminación de los sólidos, tanto el total como el volátil, son similares 38% y 39% respectivamente. El pH final es de  $7,50 \pm 0,01$  y, la relación final AGV/ alcalinidad es 0,08. Cabe destacar que, la alcalinidad presenta un incremento a la salida hasta un  $6.700,50 \pm 1,02 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$  y, los AGV una disminución.

Tabla 94. Ensayo FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

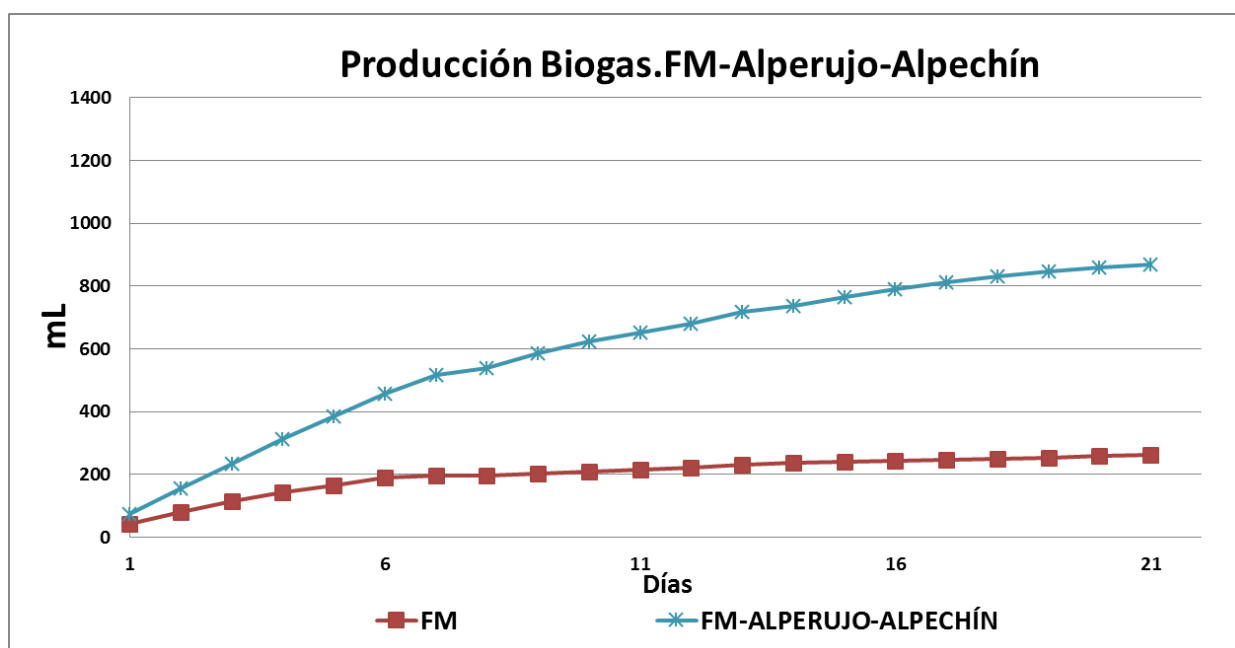
#### Fango Mixto-Alperujo-Alpechín

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$25.462,01 \pm 0,70$	$10.240,45 \pm 0,74$	60
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$24.975,22 \pm 0,82$	$15.430,38 \pm 0,84$	38
Materia Seca	%	2,50	1,54	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$17.542,36 \pm 0,85$	$10.750,77 \pm 0,86$	39
Materia Volátil	%	70,24	69,67	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,50 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,00 \pm 0,02$	$12,10 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.100,78 \pm 1,00$	$6.700,50 \pm 1,02$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$740,98 \pm 1,04$	$555,01 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$991,65 \pm 1,04$	$666,18 \pm 1,00$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,24	0,08	

### 5.4.3.1. Producción de Biogás

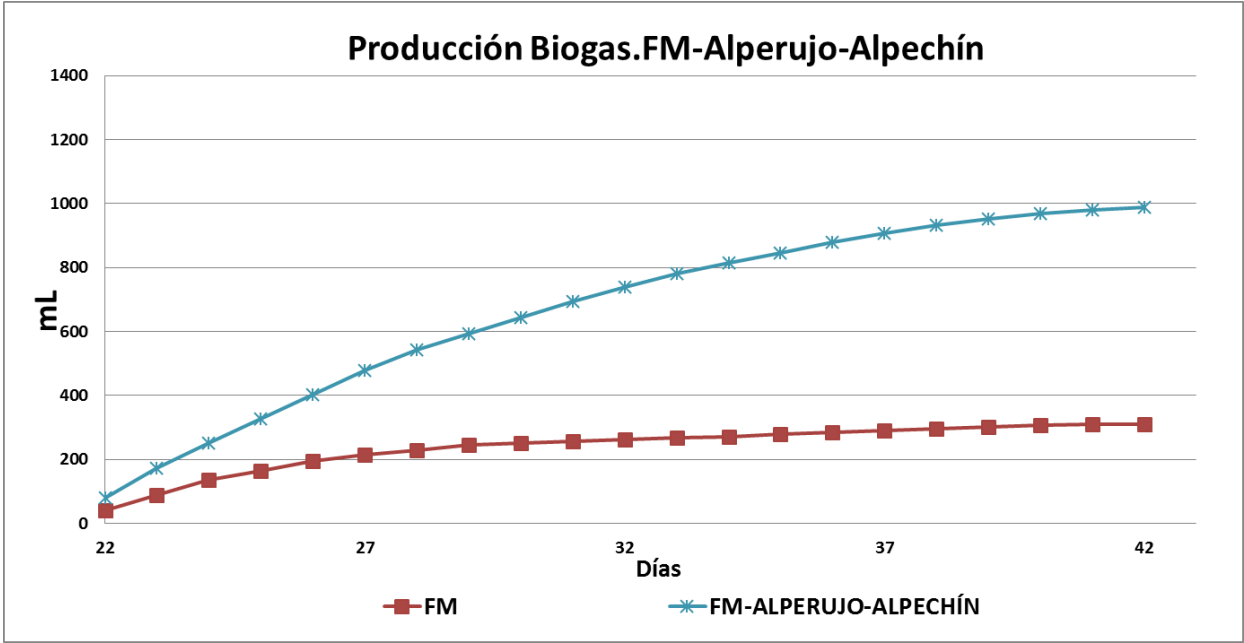
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de alperujo y alpechín. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de fangos mixtos de EDAR con mezcla de alperujo y alpechín.

En la **fase 1** del ensayo de FM-Alperujo-Alpechín (gráfica 169), la producción de biogás del FM-Alperujo-Alpechín presenta un crecimiento rápido hasta el día 18, en el cual se estabiliza, generando una producción total de biogás de 868 mL, siendo significativamente superior a la producción de biogás del ensayo del fango mixto.



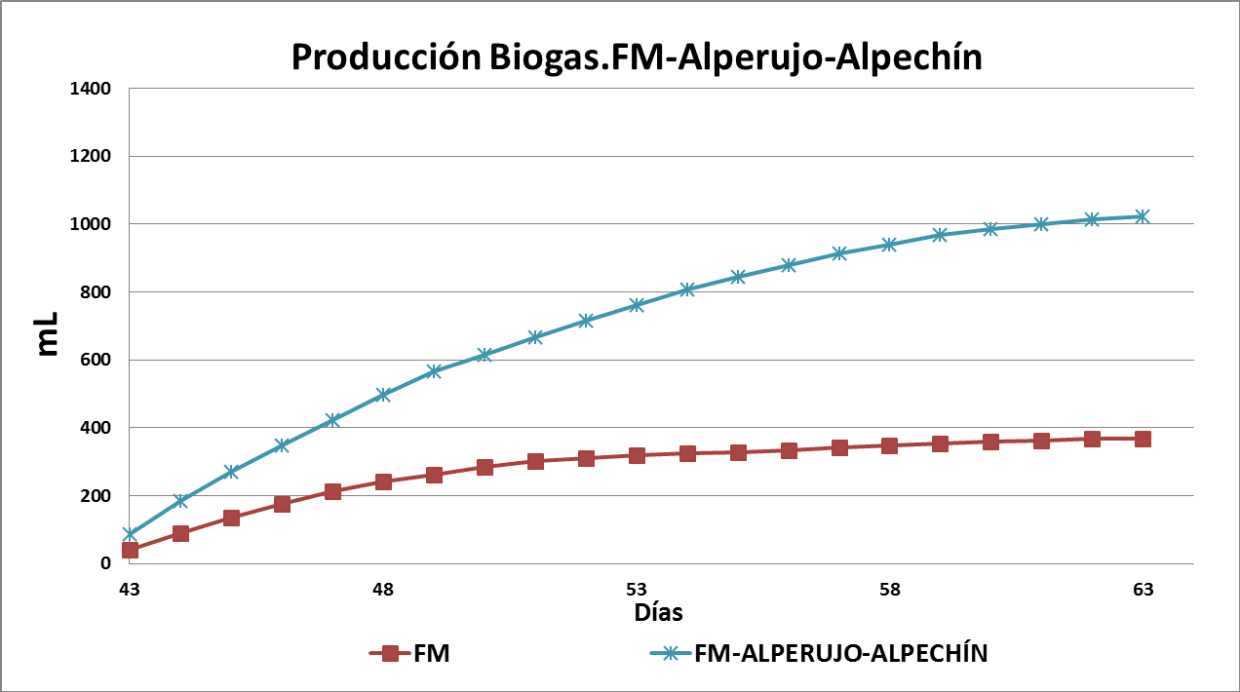
Gráfica 169. Producción Biogás FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase1

La producción de biogás de la **fase 2** del ensayo de FM-Alperujo-Alpechín presenta un crecimiento rápido hasta el día 40, en el cual se estabiliza, generando una producción total de biogás de 989 mL, como se puede observar en la gráfica 170, es superior al ensayo de fango mixto.



Gráfica 170. Producción Biogás FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

Como se puede observar en la gráfica 171, que corresponde con la **fase 3** del ensayo FM-Alperujo-Alpechín, la producción de biogás presenta un crecimiento exponencial hasta el día 60, en el cual se estabiliza, generando una producción total de biogás de 989 mL. El ensayo del FM-Alperujo-Alpechín, aumenta de manera significativa el volumen de biogás generado en 654mL, respecto al ensayo de fango mixto (367mL).

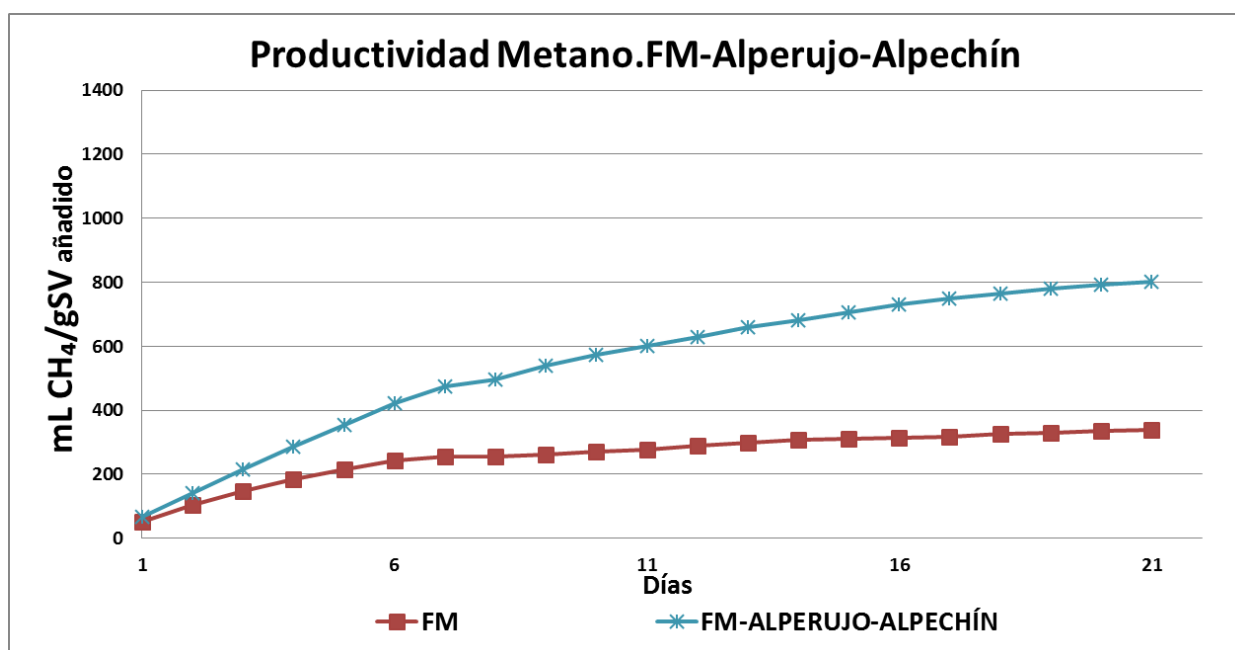


Gráfica 171. Producción Biogás FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

### 5.4.3.2. Productividad de Metano

En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de alperujo y alpechín, de las distintas fases temporales.

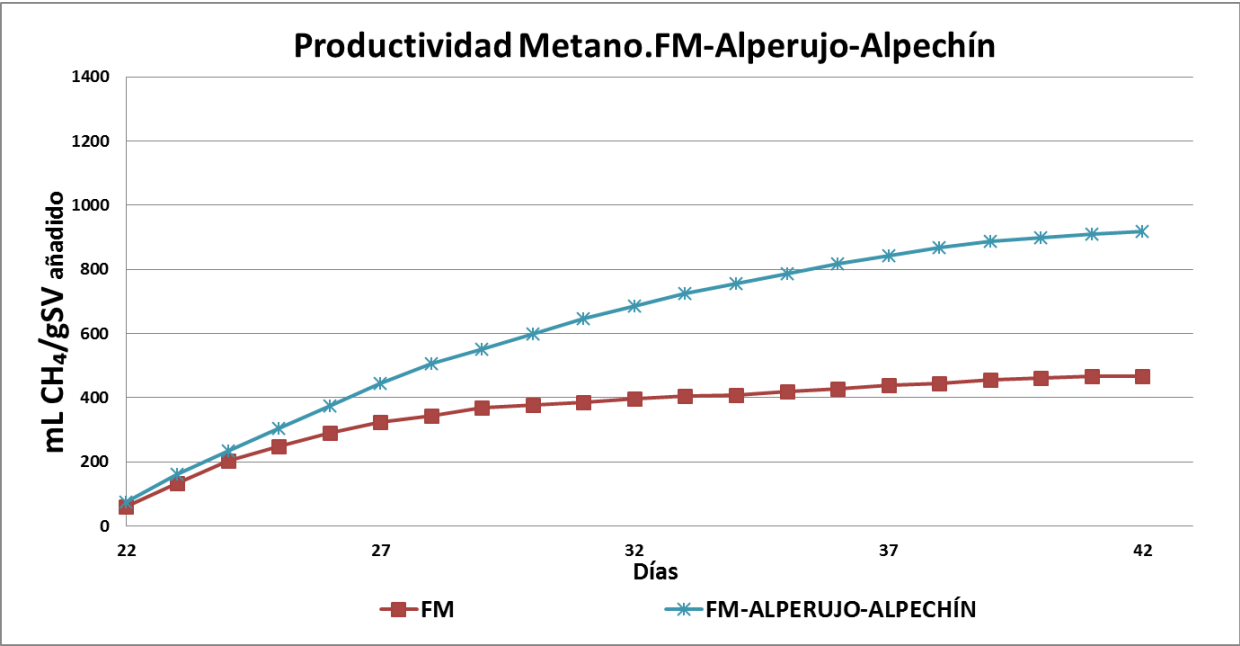
Con respecto a la productividad de metano de la fase 1 del ensayo de FM-Alperujo-Alpechín, presenta una productividad total de metano de  $801 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ , superior al fango mixto ( $338 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ ). Tal y como se representa en la gráfica 172.



Gráfica 172. Productividad Metano FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase I

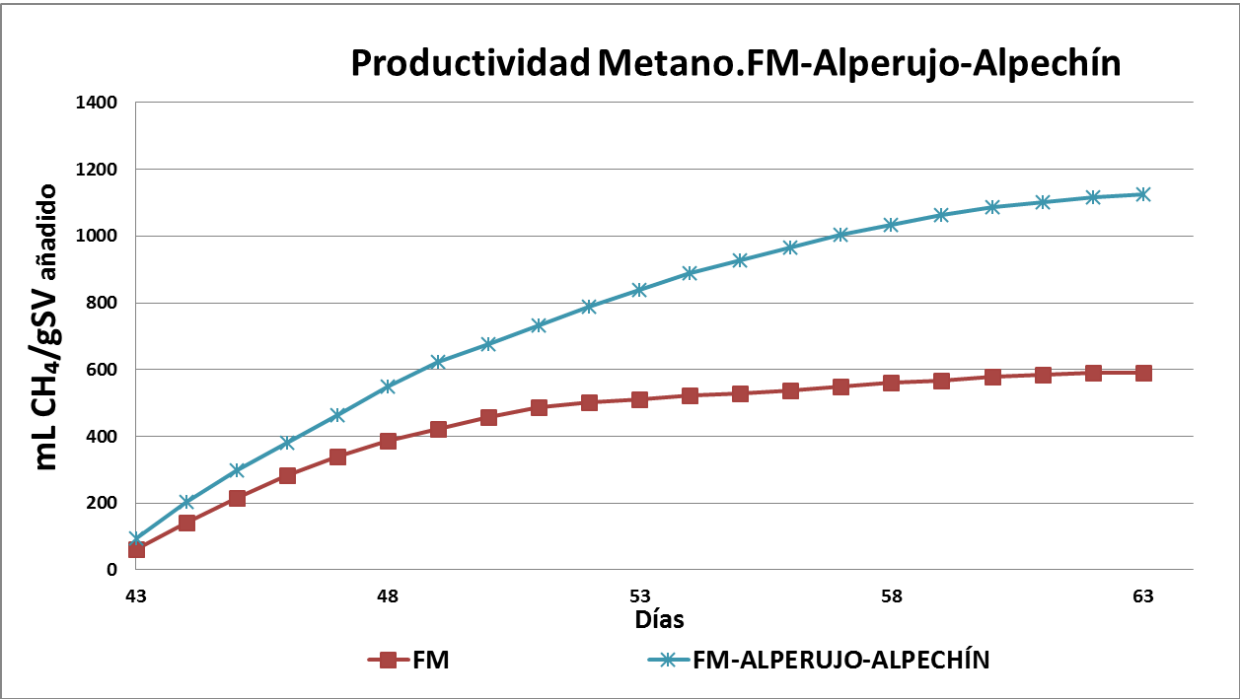


En la **fase 2** (gráfica 173) la productividad de metano del ensayo FM-Alperujo-Alpechín, es de 920 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, superior al fango mixto (466 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>)<sup>1</sup>.



Gráfica 173. Productividad Metano FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

En la **fase 3**, la productividad de metano de esta mezcla de residuos, es de 1.124 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, superior al fango mixto (589 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>). Tal y como se observa en la gráfica (174).



Gráfica 174. Productividad Metano FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

#### **5.4.3.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es igual en todas las fases. El ensayo de FM-Alperujo-Alpechín presenta un porcentaje de metano en el biogás del 75%, un 5% superior al fango mixto (70%).

A la vista de los resultados, la adición de fangos mixtos de EDAR con mezcla de alperujo y alpechín en una co-digestión anaerobia ha conducido a un incremento significativo en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al fango mixto.

#### 5.4.4. Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de Aguas de Glicerina y SueroB

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de glicerina y suero bruto. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

Los resultados analíticos de la **fase 1**, se muestran en la tabla 95. El ensayo de fango mixto con mezcla de glicerina y suero bruto presenta una eliminación de DQO del 52%. Con respecto a los sólidos tienen un porcentaje de eliminación similar siendo superior en los SV (32%). La alcalinidad presenta un incremento a la salida hasta un  $6.600,15 \pm 1,05 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . El pH aumenta en la salida del ensayo a  $7,40 \pm 0,01$ .

Tabla 95. Ensayo FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

##### Fango Mixto-Glicerina-Suero Bruto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$21.438,21 \pm 0,72$	$10.340,45 \pm 0,78$	52
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$19.875,30 \pm 0,83$	$13.960,20 \pm 0,87$	30
Materia Seca	%	1,99	1,40	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$11.955,87 \pm 0,85$	$8.130,02 \pm 0,89$	32
Materia Volátil	%	60,15	58,24	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,40 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,05 \pm 0,02$	$12,00 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.400,11 \pm 1,01$	$6.600,15 \pm 1,05$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$1.173,93 \pm 0,97$	$924,74 \pm 1,01$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$1.365,52 \pm 0,97$	$1.108,89 \pm 1,01$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,27	0,14	

En la **fase 2**, el ensayo de fango mixto con mezcla de glicerina y suero bruto presenta una eliminación de materia orgánica del 52%. Con respecto a los sólidos tienen un porcentaje de eliminación similar siendo superior en los SV (36%). La alcalinidad presenta un incremento a la salida hasta un  $6.850,82 \pm 1,00 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . El pH aumenta en la salida del ensayo a  $7,40 \pm 0,01$ . Tal y como se observa en la tabla 96.

Tabla 96. Ensayo FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

#### Fango Mixto-Glicerina-Suero Bruto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$24.510,12 \pm 0,77$	$11.780,08 \pm 0,74$	52
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$23.145,50 \pm 0,82$	$15.230,41 \pm 0,80$	34
Materia Seca	%	2,31	1,52	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$15.780,52 \pm 0,80$	$10.021,63 \pm 0,86$	36
Materia Volátil	%	68,18	65,80	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,40 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,05 \pm 0,02$	$12,00 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.600,78 \pm 1,05$	$6.850,82 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$980,65 \pm 0,98$	$890,30 \pm 1,02$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$1.140,23 \pm 0,98$	$1.067,41 \pm 1,02$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,21	0,13	

Como se representa en la tabla 97 que corresponde con la **fase 3**. El ensayo de fango mixto con mezcla de glicerina y suero bruto presenta una eliminación de DQO del 49%. Con respecto a los sólidos tienen un porcentaje de eliminación similar siendo superior en los SV (35%). La alcalinidad presenta un incremento a la salida hasta un  $6.124,15 \pm 1,02$  mg  $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . El pH aumenta en la salida del ensayo a  $7,40 \pm 0,01$ .

Tabla 97. Ensayo FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

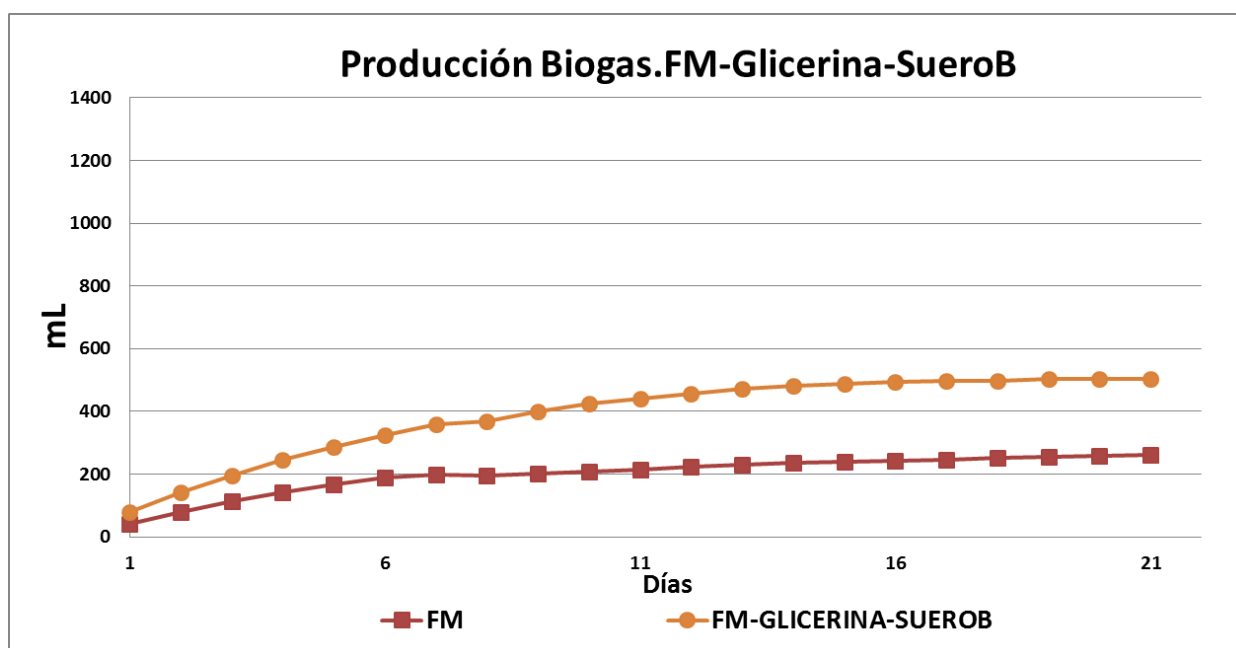
#### Fango Mixto-Glicerina-Suero Bruto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg $\text{L}^{-1}$	$22.650,12 \pm 0,72$	$11.456,89 \pm 0,74$	49
ST	mg $\text{L}^{-1}$	$21.760,66 \pm 0,80$	$15.156,82 \pm 0,82$	30
Materia Seca	%	2,18	1,52	
SV	mg $\text{L}^{-1}$	$15.460,12 \pm 0,82$	$10.058,44 \pm 0,84$	35
Materia Volátil	%	71,05	66,36	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,40 \pm 0,01$	
Conductividad	mS $\text{cm}^{-1}$	$12,05 \pm 0,02$	$12,00 \pm 0,02$	
Alcalinidad	mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.350,41 \pm 1,05$	$6.124,15 \pm 1,02$	
AGV	mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$1.100,35 \pm 0,99$	$730,41 \pm 1,03$	
AGV	mg $\text{CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$1.279,85 \pm 0,99$	$876,99 \pm 1,03$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,25	0,12	

#### 5.4.4.1. Producción de Biogás

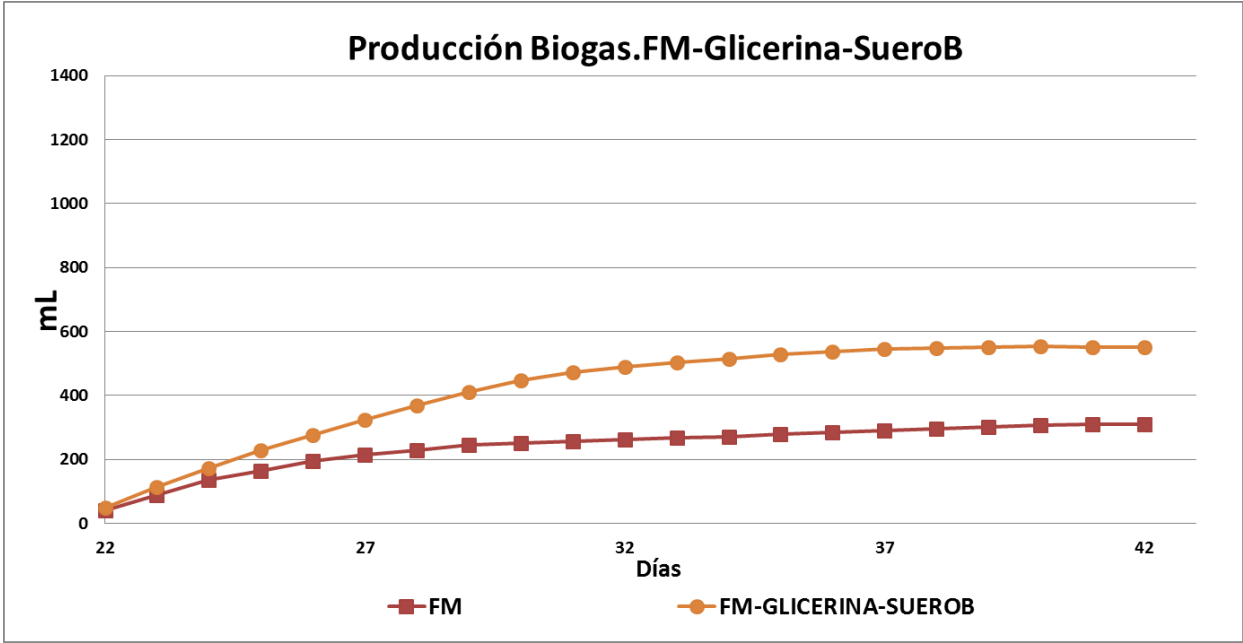
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de glicerina y suero bruto. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de fangos mixtos de EDAR con mezcla de glicerina y suero bruto.

En la **fase 1** como se puede observar en la gráfica 175, el ensayo de fango mixto con mezcla de glicerina y suero bruto presenta un crecimiento lento hasta el día 11, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, generando un volumen total de 503 mL, incrementando en 241 mL, la producción del ensayo del fango mixto (261mL).



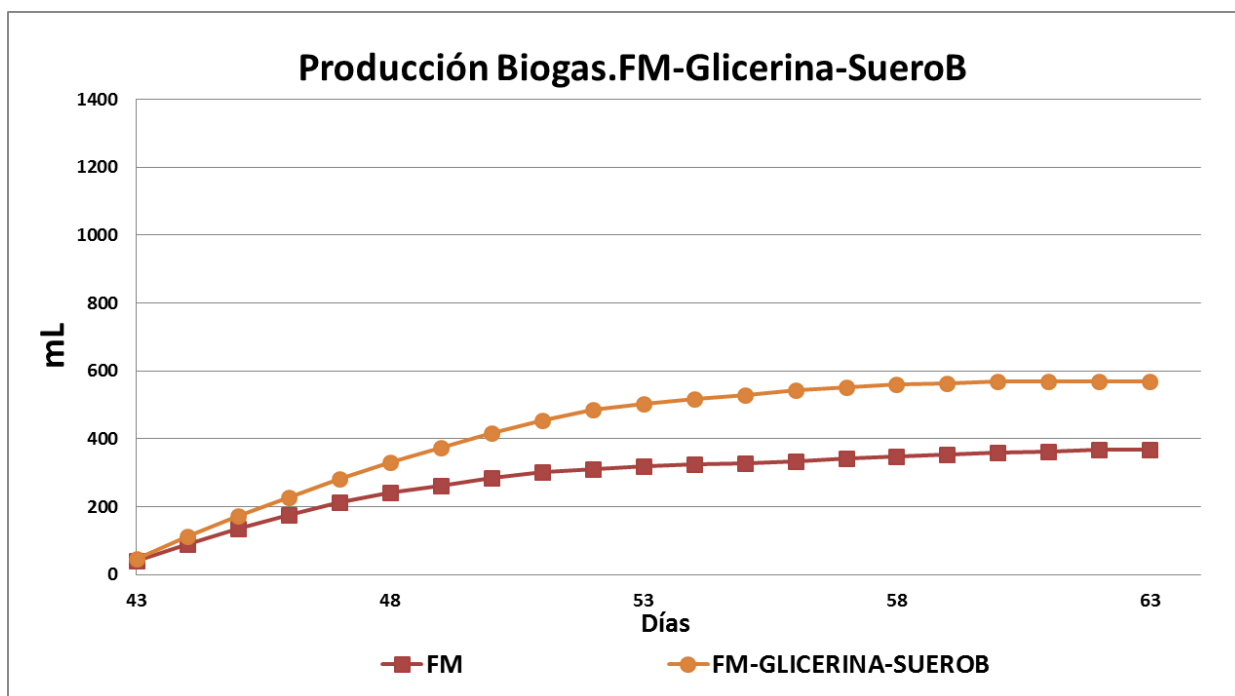
Gráfica 175. Producción Biogás FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

El ensayo de fango mixto con mezcla de glicerina y suero bruto, en la **fase 2**, presenta un crecimiento lento hasta el día 35, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, generando un volumen total de 551 mL, incrementando en 242 mL, la producción del ensayo del fango mixto (309 mL). Como se puede observar en la gráfica 176.



Gráfica 176. Producción Biogás FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

Como se puede observar en la gráfica 177, respecto a la **fase 3**. El ensayo de fango mixto con mezcla de glicerina y suero bruto presenta un crecimiento lento hasta el día 47. Del día 47 al 53, presenta un crecimiento rápido en la producción de biogás. A partir del día 54, se estabiliza la producción de biogás, generando un volumen total de 568 mL e, incrementando en 201 mL la producción del ensayo del fango mixto (367 mL).



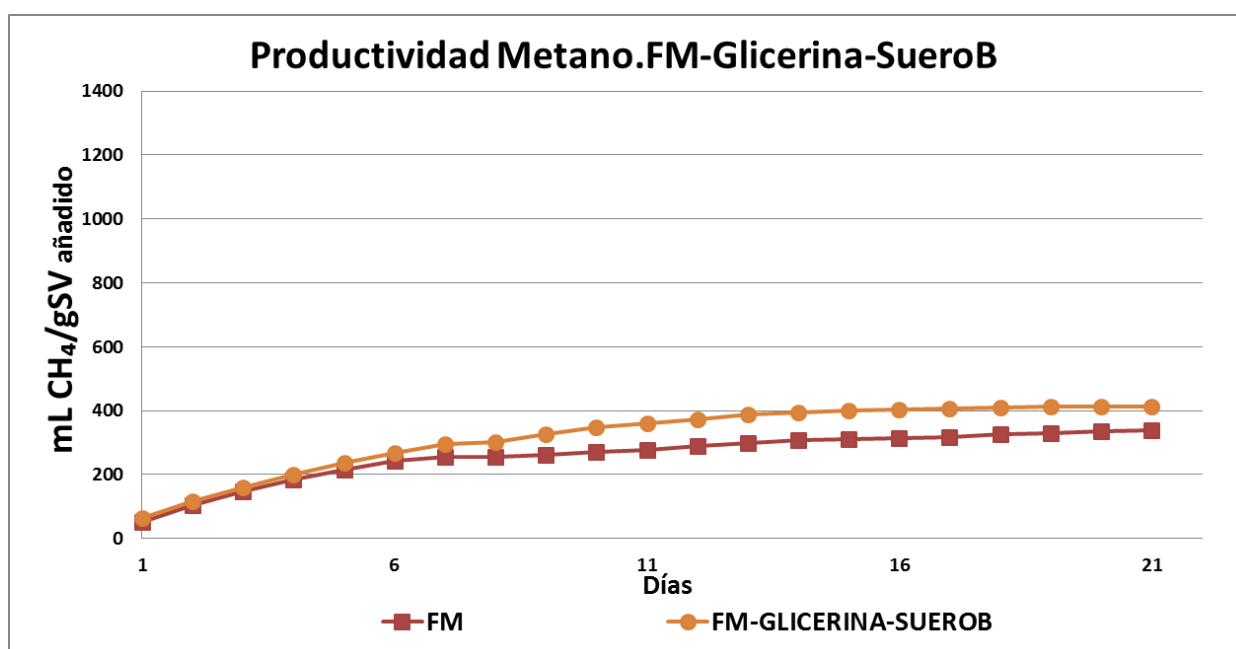
Gráfica 177. Producción Biogás FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3



#### 5.4.4.2. Productividad de Metano

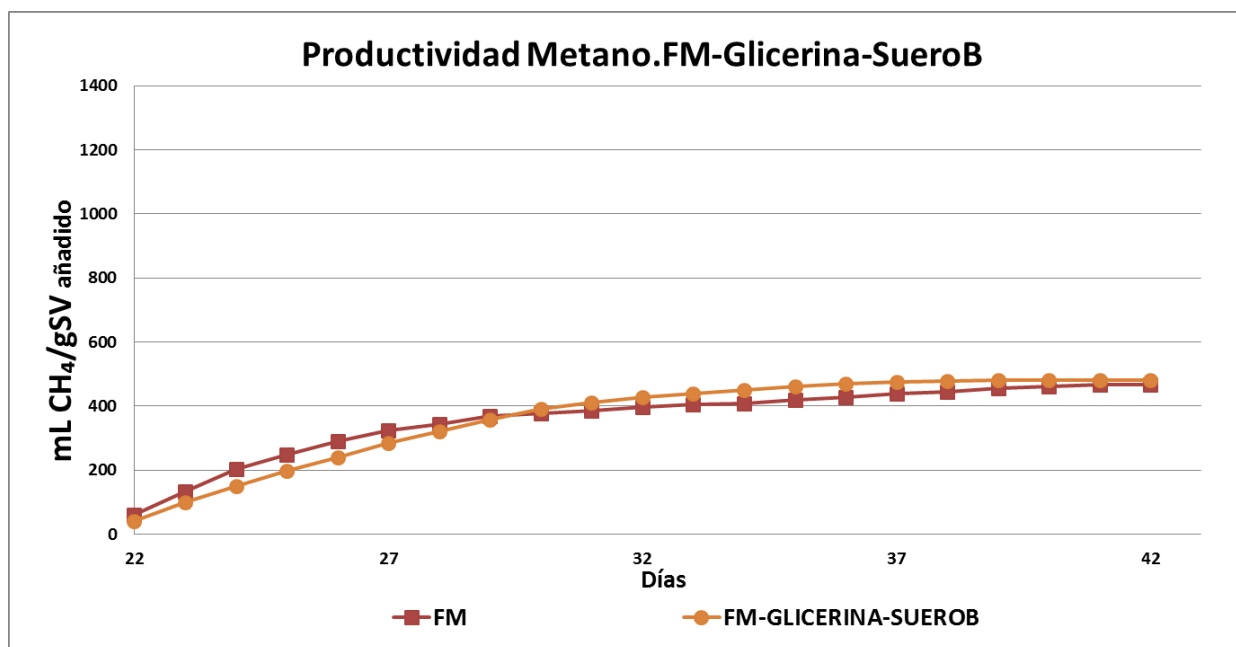
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de glicerina y suero bruto, de las distintas fases temporales.

En la **fase 1**, tal y como se muestra en la gráfica 178 la productividad de metano del ensayo de FM-Glicerina-SueroB es de 412 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, superior a la productividad del ensayo de fango mixto (338 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>).



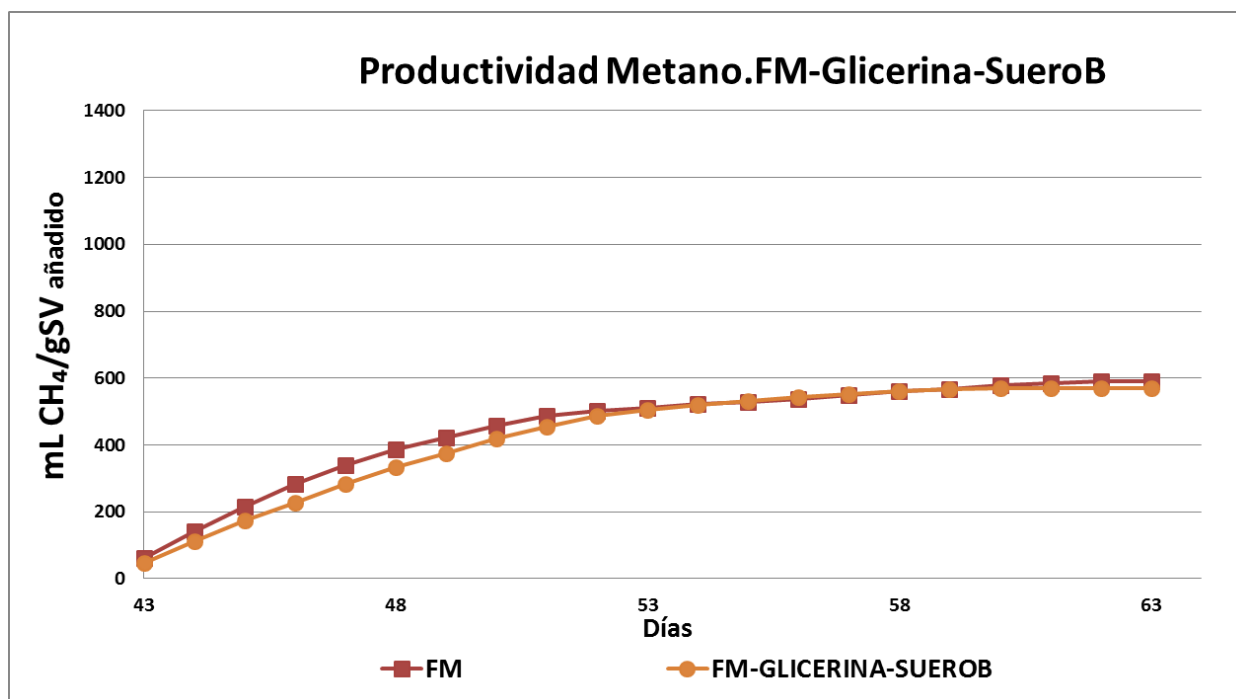
Gráfica 178. Productividad Metano FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

En la **fase 2**, la productividad de metano del ensayo de FM-Glicerina-SueroB es de 480 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> y, la productividad del ensayo de fango mixto es de 466 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>. Del día 22 al 30, la productividad de FM-Glicerina-SueroB es inferior al fango mixto. A partir del día 27, la productividad del ensayo de la mezcla de residuos de alta carga orgánica es ligeramente superior al fango mixto. Tal y como se muestra en la gráfica 179.



Gráfica 179. Productividad Metano FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

Tal y como se muestra en la gráfica 180, que corresponde con la **fase 3** del ensayo. La productividad de metano del ensayo de FM-Glicerina-SueroB, es de 569 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup> inferior a la productividad del ensayo de fango mixto, que es de 589 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>. Del día 43 al 52, la productividad de FM-Glicerina-SueroB es inferior al fango mixto. A partir del día 27, la productividad del ensayo de FM-Glicerina-SueroB es similar al ensayo de fango mixto.



Gráfica 180. Productividad Metano FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3.

#### **5.4.4.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es similar en todas las fases, sufriendo un ligero aumento a partir de la primera fase.

En la primera fase el porcentaje de metano en el ensayo de FM-Glicerina-SueroB es del 65%, un 5% menor, con respecto al ensayo del fango mixto (70%). En la fase 2, el porcentaje de metano en el ensayo de FM-Glicerina-SueroB es del 68%, un 7% menor con respecto al ensayo del fango mixto (75%).

En la última fase, el porcentaje de metano en el ensayo de FM-Glicerina-SueroB es del 75%, igual al ensayo del fango mixto (75%).

A la vista de los resultados, la adición de fangos mixtos de EDAR con mezcla glicerina y suero bruto en una co-digestión anaerobia ha conducido a una mejoría en el incremento en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al fango mixto debido a que la glicerina es un residuo de difícil tratamiento.

#### 5.4.5. Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de Lixiviado y SueroB

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de lixiviado y suero bruto. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

Como se muestra en la tabla 98, respecto a la **fase 1**. El ensayo de FM-Lixiviado-SueroB tiene una entrada de materia orgánica de  $19.854,11 \pm 0,74 \text{ mg L}^{-1}$  y una salida de  $10.610,45 \pm 0,78 \text{ mg L}^{-1}$ , por lo que presenta una eliminación del 51%. Con respecto a los sólidos, el porcentaje de eliminación en los sólidos totales es de 40%. Sin embargo, los sólidos volátiles presentan un porcentaje de eliminación inferior, llegando al 31%. Cabe destacar un aumento en el porcentaje de materia volátil hasta un 74,74%.

Tabla 98. Ensayo FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

##### Fango Mixto-Lixiviado-Suero Bruto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$19.854,11 \pm 0,74$	$10.610,45 \pm 0,78$	51
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$17.652,24 \pm 0,82$	$10.610,36 \pm 0,86$	40
Materia Seca	%	1,77	1,06	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$11.560,42 \pm 0,85$	$7.930,36 \pm 0,89$	31
Materia Volátil	%	65,49	74,74	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,30 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,34 \pm 0,02$	$12,30 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.500,78 \pm 1,04$	$4.540,64 \pm 1,09$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$583,10 \pm 0,94$	$379,30 \pm 1,03$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$699,72 \pm 0,94$	$455,17 \pm 1,03$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,17	0,08	

Los resultados de los análisis de la **fase 2** se muestran en la tabla 99, el ensayo de FM-Lixiviado-SueroB tiene una entrada de DQO de  $22.180,44 \pm 0,70 \text{ mg L}^{-1}$  y una salida de  $11.450,52 \pm 0,74 \text{ mg L}^{-1}$ , por lo que presenta una eliminación del 48%. Con respecto a los sólidos, el porcentaje de eliminación en los sólidos volátiles es de 37%. Sin embargo, los sólidos totales presentan un porcentaje de eliminación inferior, llegando al 26%. Cabe destacar una disminución en el porcentaje de materia volátil hasta un 71,96% y, la relación AGV/alcalinidad disminuye de un 0,17 hasta un 0,08.

Tabla 99. Ensayo FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

#### Fango Mixto-Lixiviado-Suero Bruto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$22.180,44 \pm 0,70$	$11.450,52 \pm 0,74$	48
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$17.560,65 \pm 0,83$	$12.980,77 \pm 0,86$	26
Materia Seca	%	1,76	1,30	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$14.742,12 \pm 0,89$	$9.340,44 \pm 0,90$	37
Materia Volátil	%	83,95	71,96	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,30 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,34 \pm 0,02$	$12,30 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.500,20 \pm 1,05$	$4.400,87 \pm 1,08$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$600,01 \pm 0,99$	$350,14 \pm 0,97$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$720,03 \pm 0,99$	$420,19 \pm 0,97$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,17	0,08	

En la **fase 3**, el ensayo de FM-Lixiviado-SueroB tiene una entrada de materia orgánica de  $20.470,01 \pm 0,76 \text{ mg L}^{-1}$  y una salida de  $11.346,87 \pm 0,78 \text{ mg L}^{-1}$ , por lo que presenta una eliminación del 45%. Con respecto a los sólidos, el porcentaje de eliminación en los sólidos volátiles es de 35%. Sin embargo, los sólidos totales presentan un porcentaje de eliminación inferior, del 31%. Cabe destacar una disminución en el porcentaje de materia volátil hasta un 71,46%, tan solo un 5%. La relación AGV/alcalinidad disminuye de un 0,16 hasta un 0,08. Como se muestra en la tabla 100.

Tabla 100. Ensayo FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

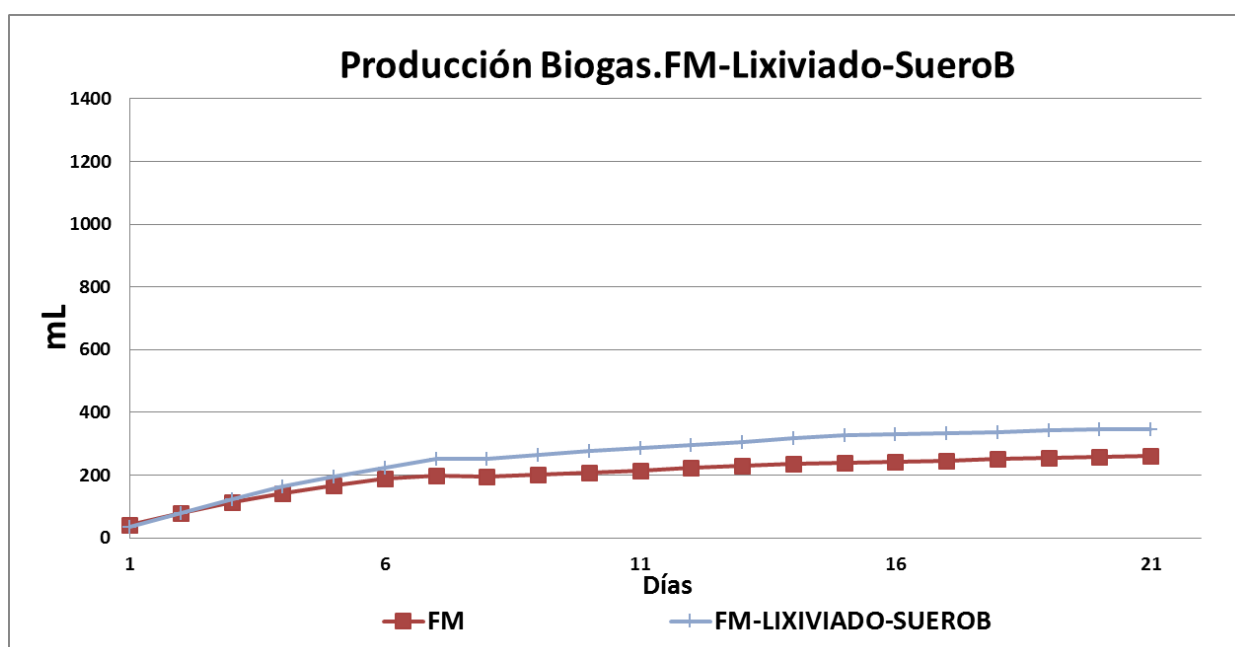
#### Fango Mixto-Lixiviado-Suero Bruto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$20.470,01 \pm 0,76$	$11.346,87 \pm 0,78$	45
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$18.750,05 \pm 0,81$	$13.000,56 \pm 0,85$	31
Materia Seca	%	1,88	1,30	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$14.230,14 \pm 0,85$	$9.290,42 \pm 0,86$	35
Materia Volátil	%	75,89	71,46	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,30 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,34 \pm 0,02$	$12,30 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.650,22 \pm 1,00$	$4.987,33 \pm 1,03$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$600,41 \pm 1,02$	$380,65 \pm 0,98$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$680,36 \pm 1,02$	$456,20 \pm 0,98$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,16	0,08	

### 5.4.5.1. Producción de Biogás

En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de lixiviado y suero bruto. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de fangos mixtos de EDAR con mezcla de lixiviado y suero bruto.

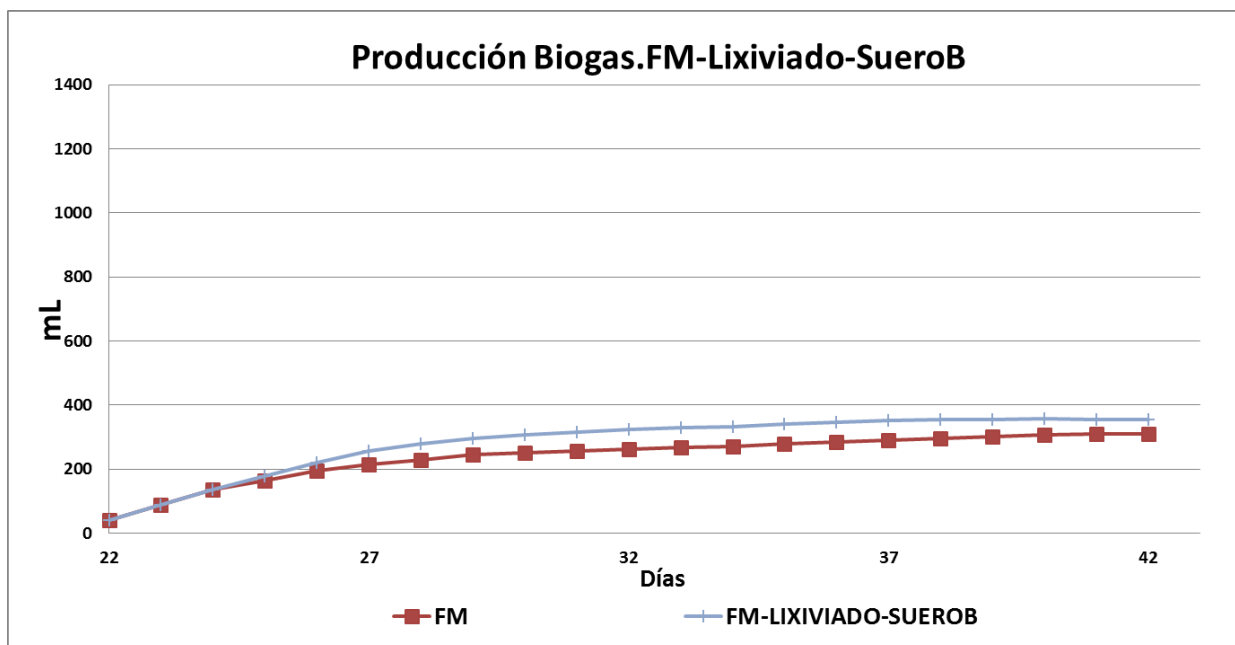
Como se representa en la gráfica 181, respecto a la **fase 1** del ensayo de fango mixto con mezcla de lixiviado y suero bruto. La adición de fango mixto junto a la mezcla de lixiviado y suero bruto aumenta ligeramente la producción de biogás. El ensayo de FM-Lixiviado-SueroB presenta un crecimiento similar a la producción del fango mixto, diferenciándose a partir del día 7. El FM-Lixiviado-SueroB genera un volumen total de biogás de 346 mL. En comparación con el ensayo de fango mixto (261 mL), se incrementa la producción de biogás en 85 mL.



Gráfica 181. Producción Biogás FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

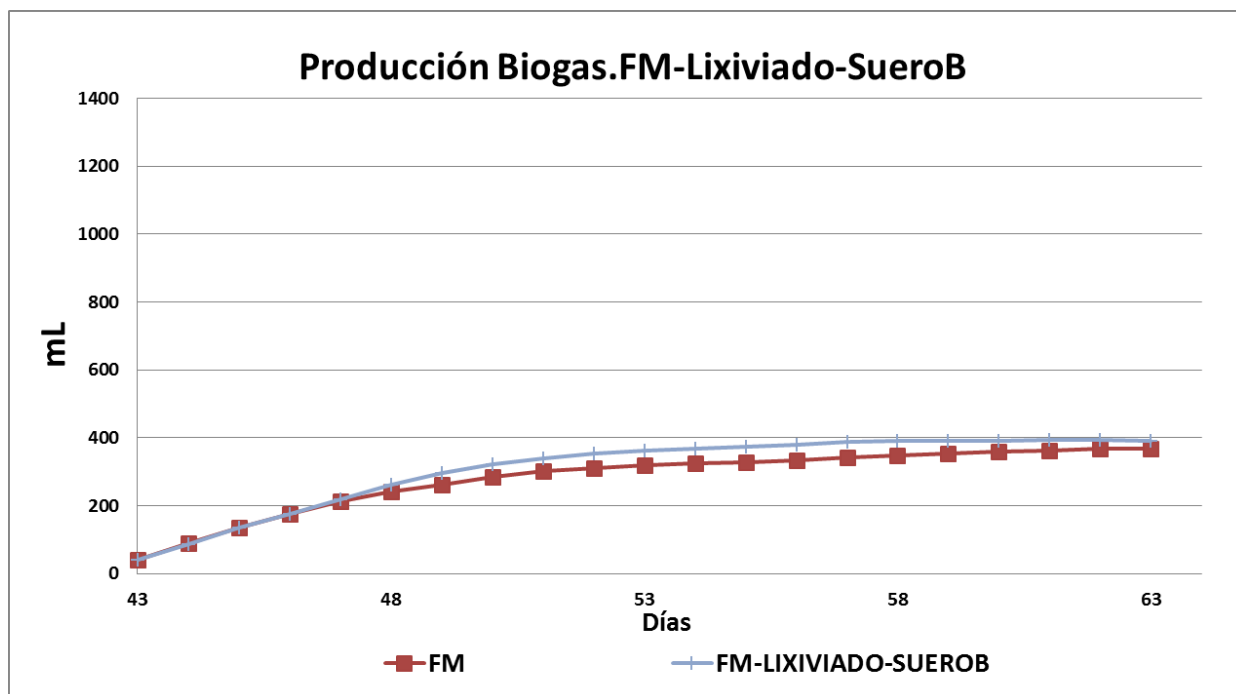


En la **fase 2** como se representa en la gráfica 182, el ensayo de FM-Lixiviado-SueroB aumenta ligeramente la producción de biogás. El ensayo de FM-Lixiviado-SueroB presenta un crecimiento similar a la producción del fango mixto, diferenciándose a partir del día 27. El FM-Lixiviado-SueroB genera un volumen total de biogás de 354 mL. En comparación con el fango mixto (309mL), se incrementa la producción de biogás en 45 mL.



Gráfica 182. Producción Biogás FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

La producción de biogás de la **fase 3** se representa en la gráfica 183, la adición del fango mixto junto a la mezcla de lixiviado y suero bruto aumenta ligeramente la producción de biogás. El ensayo de FM-Lixiviado-SueroB presenta un crecimiento similar a la producción del fango mixto, diferenciándose a partir del día 48. El FM-Lixiviado-SueroB genera un volumen total de biogás de 392 mL. En comparación con el fango mixto (367mL), se incrementa la producción de biogás en un 25 mL.

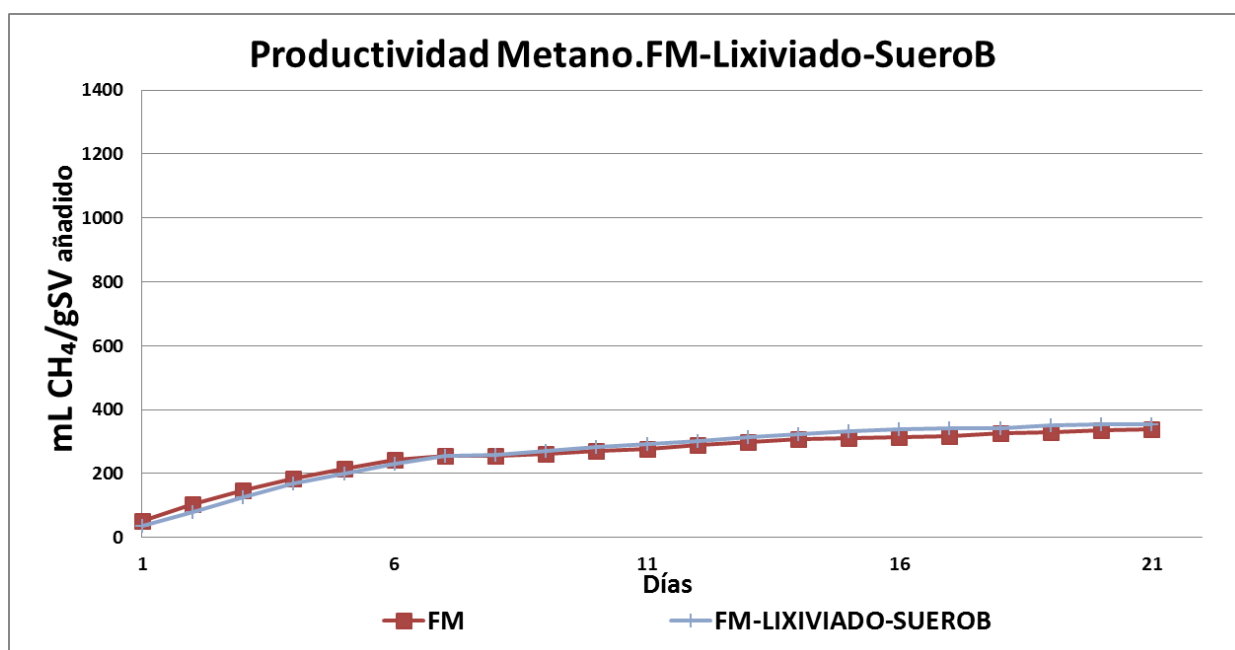


Gráfica 183. Producción Biogás FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

#### 5.4.5.2. Productividad de Metano

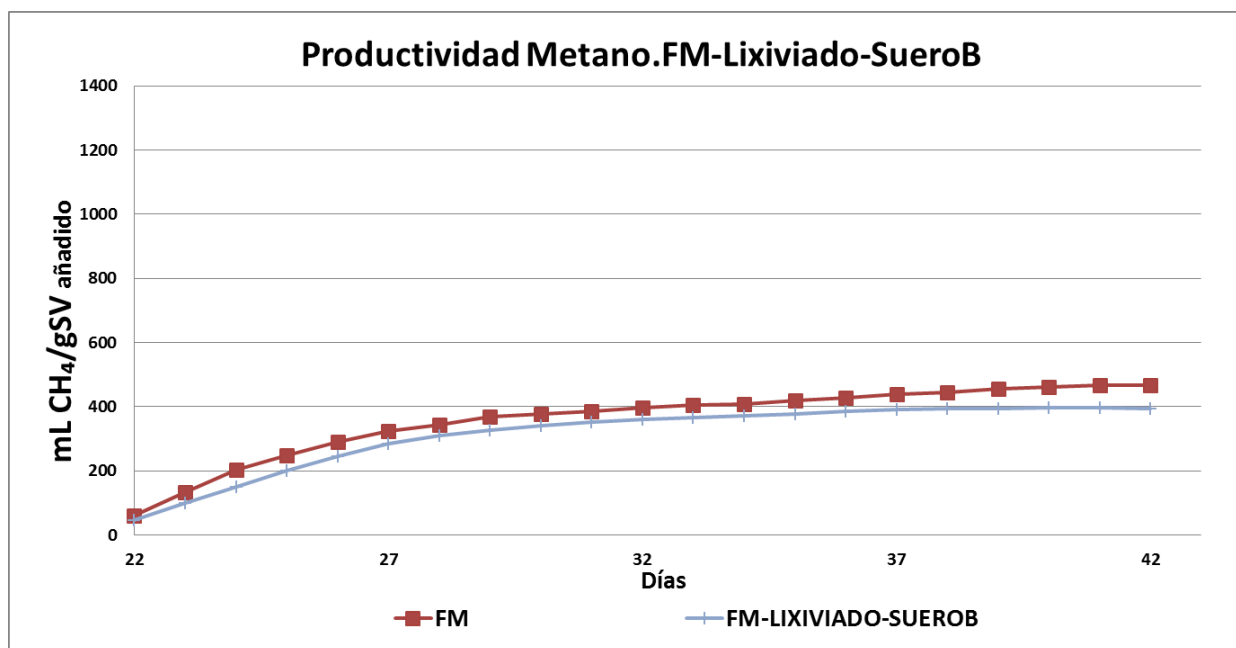
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de lixiviado y suero bruto, de las distintas fases temporales.

Cuanto a la productividad de metano de la **fase 1**, el ensayo FM-Lixiviado-SueroB, presenta una productividad de 354 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, superior al ensayo del fango mixto 338 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, tal y como se observa en la gráfica 184.



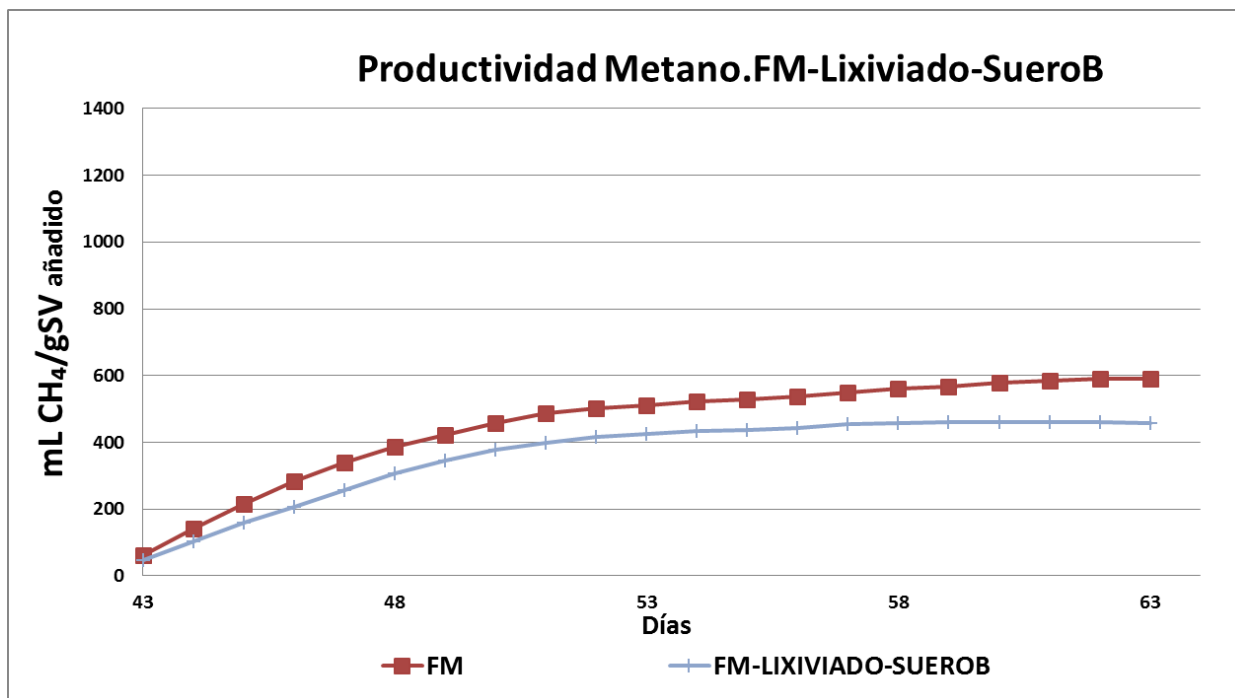
Gráfica 184. Productividad Metano FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

En la **fase 2** la productividad de metano se representa en la gráfica 185. El ensayo de FM-Lixiviado-SueroB, presenta una productividad de 394 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, inferior a la del fango mixto 466 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 185. Productividad Metano FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

La productividad de metano de la **fase 3**, del ensayo de FM-Lixiviado-SueroB, presenta una productividad de 459 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, inferior al ensayo del fango mixto 589 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 186. Productividad Metano FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

#### **5.4.5.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es similar en todas las fases, sufriendo un leve ascenso en las últimas fases. En la primera fase, el porcentaje de metano en el ensayo de FM-Lixiviado-SueroB es del 65%, un 5% menor, con respecto al ensayo del fango mixto (70%). Sin embargo en las últimas fases el porcentaje de metano en el ensayo de FM-Lixiviado-SueroB entorno al 70 %, un 5% menor con respecto al ensayo del fango mixto (75%).

A la vista de los resultados, la adición de fangos mixtos de EDAR con mezcla de lixiviado y suero bruto en una co-digestión anaerobia ha conducido a un ligero incremento en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al fango.

#### 5.4.6. Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de Aceite usado de cocinay Alperujo

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de aceite usado de cocina y alperujo. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la tabla 101, se recogen los resultados analíticos de la **fase 1**, se puede observar que el porcentaje de eliminación de materia orgánica en el caso del ensayo de FM-Aceite-Alperujo es del 49%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es de 30%. Sin embargo, el porcentaje de eliminación de sólidos volátiles se incrementa hasta un 37%. La alcalinidad aumenta a la salida del ensayo hasta un  $6.522,08 \pm 1,06 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . El pH y la conductividad se mantienen durante los días del ensayo.

Tabla 101. Ensayo FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

Fango Mixto-Aceite-Alperujo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	29.041,36 ±0,77	14.825,41 ±0,80	49
ST	mg L <sup>-1</sup>	26.650,77 ±0,81	18.710,66 ±0,86	30
Materia Seca	%	2,67	1,87	
SV	mg L <sup>-1</sup>	19.860,84 ±0,84	12.510,38 ±0,88	37
Materia Volátil	%	74,52	66,86	
pH		7,00 ±0,01	7,25 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	12,00 ±0,02	12,00 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	3.700,10 ±1,04	6.522,08 ±1,06	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	1.637,93 ±0,99	1.186,05 ±1,04	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	1.965,52 ±0,99	1.423,20 ±1,04	
Relación AGV/Alcalinidad		0,44	0,18	

En la **fase 2**, que corresponde con la tabla 102. Se puede observar que el porcentaje de eliminación de DQO en el caso de la mezcla FM-Aceite-Alperujo es del 47%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es de 35%. Sin embargo el porcentaje de eliminación de sólidos volátiles disminuye hasta un 33%. La alcalinidad aumenta a la salida del ensayo hasta un  $6.670,11 \pm 1,03 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . El pH y la conductividad se mantienen durante los días del ensayo.

Tabla 102. Ensayo FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

#### Fango Mixto-Aceite-Alperujo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$31.040,12 \pm 0,78$	$16.410,02 \pm 0,80$	47
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$28.471,44 \pm 0,80$	$18.450,96 \pm 0,82$	35
Materia Seca	%	2,85	1,85	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$19.475,98 \pm 0,81$	$13.060,03 \pm 0,85$	33
Materia Volátil	%	68,40	70,79	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,25 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,00 \pm 0,02$	$12,00 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.450,36 \pm 1,05$	$6.670,11 \pm 1,03$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$1.240,96 \pm 1,00$	$1.020,42 \pm 1,02$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$1.488,88 \pm 1,00$	$1.223,33 \pm 1,02$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,36	0,15	



En la **fase 3**, se puede observar que el porcentaje de eliminación de DQO en el caso de la mezcla FM-Aceite-Alperujo es del 51%. El porcentaje de eliminación de sólidos totales es de 34%. Sin embargo el porcentaje de eliminación de sólidos volátiles es menor (33%). La alcalinidad aumenta a la salida del ensayo hasta un  $6.612,69 \pm 1,05 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ . El pH y la conductividad se mantienen durante los días del ensayo. Tal y como se observa en la tabla 103.

Tabla 103. Ensayo FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

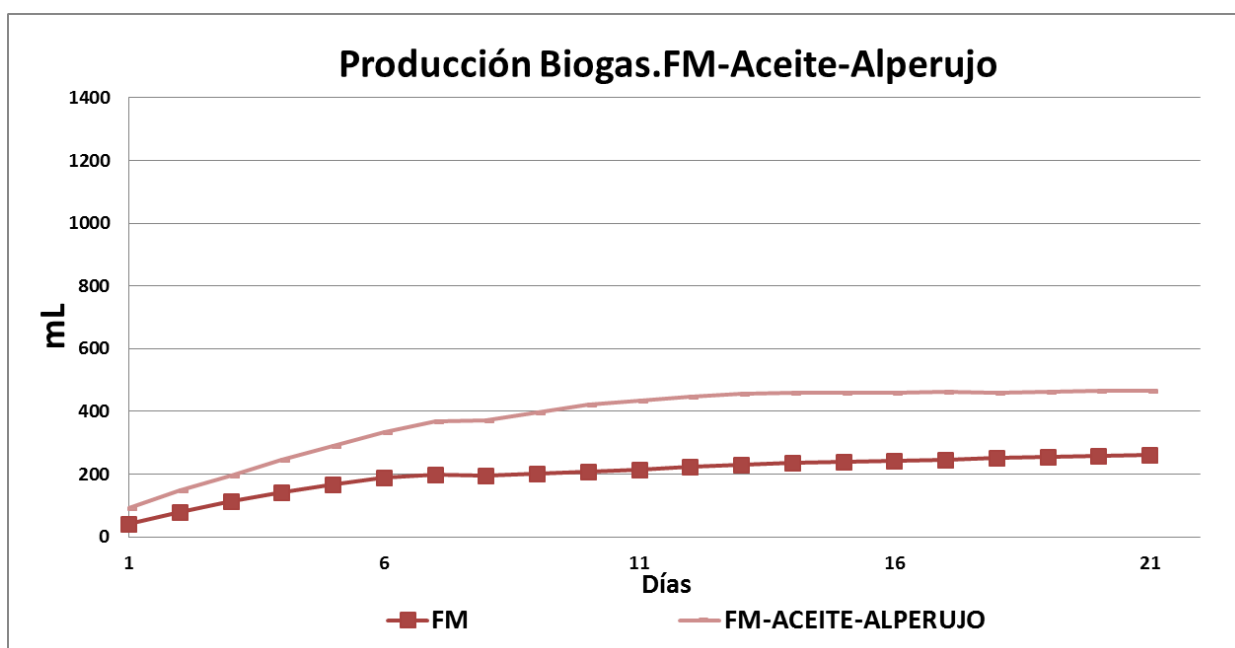
#### Fango Mixto-Aceite-Alperujo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$30.120,11 \pm 0,70$	$14.650,67 \pm 0,72$	51
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$27.975,15 \pm 0,80$	$18.370,57 \pm 0,85$	34
Materia Seca	%	2,80	1,84	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$19.245,26 \pm 0,81$	$12.869,43 \pm 0,83$	33
Materia Volátil	%	68,79	70,05	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,25 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,00 \pm 0,02$	$12,00 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.650,32 \pm 1,07$	$6.612,69 \pm 1,05$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$1.450,96 \pm 1,00$	$1.200,55 \pm 0,99$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$1.740,45 \pm 1,00$	$1.439,44 \pm 0,99$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,40	0,18	

#### 5.4.6.1. Producción de Biogás

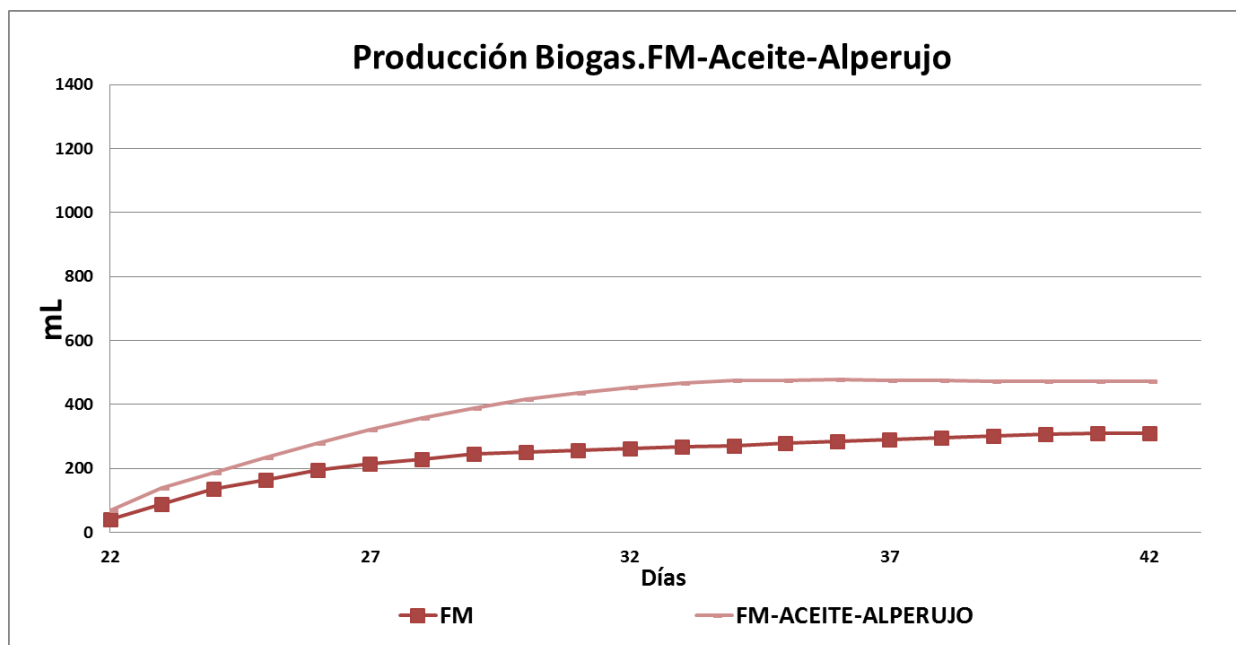
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de aceite usado de cocina y alperujo. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de fangos mixtos de EDAR con mezcla de aceite usado de cocina y alperujo.

La producción de biogás en la **fase 1** presenta un crecimiento hasta el día 9, a partir del cual se estabiliza, generando una producción total de biogás de 466 mL. Con respecto al ensayo de fango mixto (261mL), el ensayo de FM-Aceite-Alperujo (466 mL) incrementa la producción de biogás en 205mL, tal y como se representa en la gráfica 187.



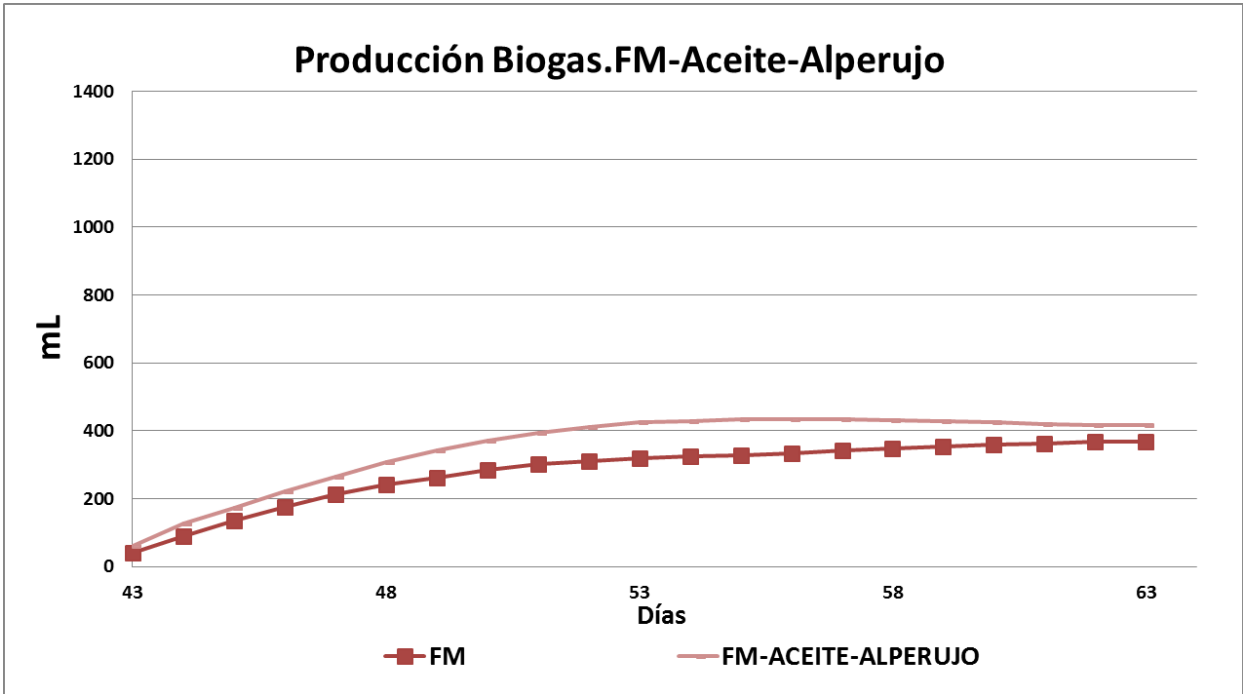
Gráfica 187. Producción Biogás FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

En la **fase 2**, tal y como se representa en la gráfica 188. La producción de biogás presenta un crecimiento hasta el día 33, a partir del cual se estabiliza, generando una producción total de biogás de 472 mL Con respecto al ensayo de fango mixto (309mL), el ensayo de FM-Aceite-Alperujo (472mL) incrementa la producción de biogás en 163 mL.



Gráfica 188. Producción Biogás FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

En la **fase 3**, la producción de biogás presenta un crecimiento hasta el día 53, a partir del cual se estabiliza, generando una producción total de biogás de 416 mL Con respecto al fango mixto (367mL ), el ensayo de FM-Aceite-Alperujo (416mL) incrementa la producción de biogás en 49 mL, tal y como se representa en la gráfica 189.

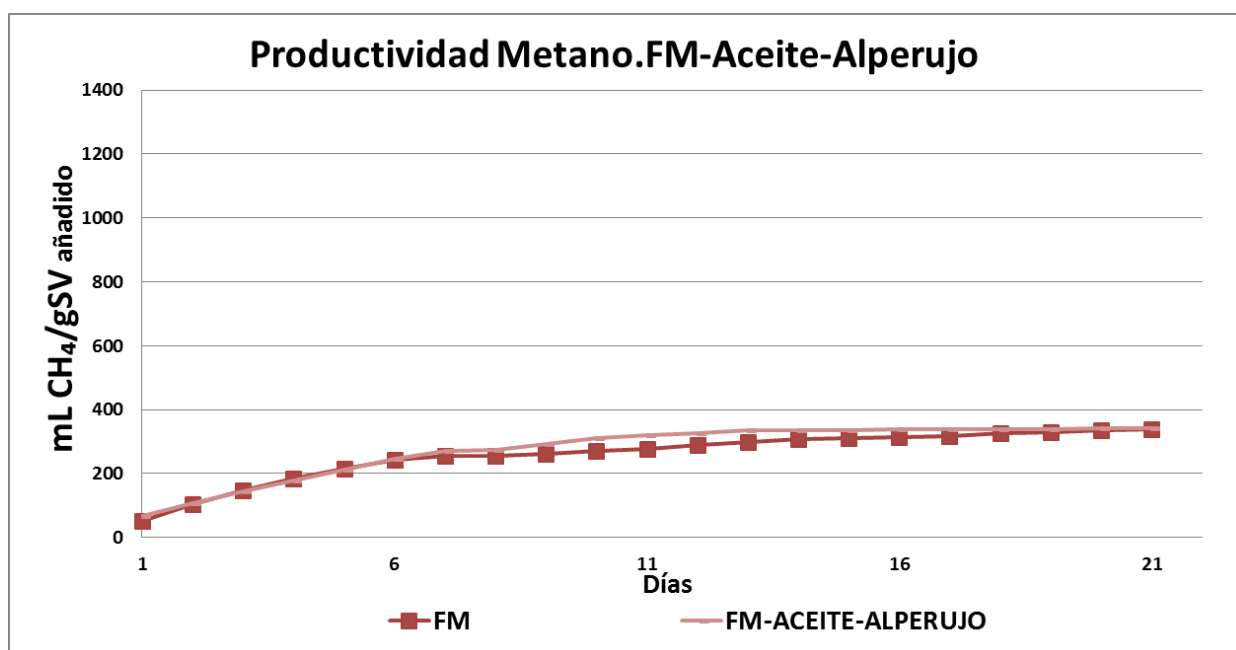


Gráfica 189. Producción Biogás FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

#### 5.4.6.2. Productividad de Metano

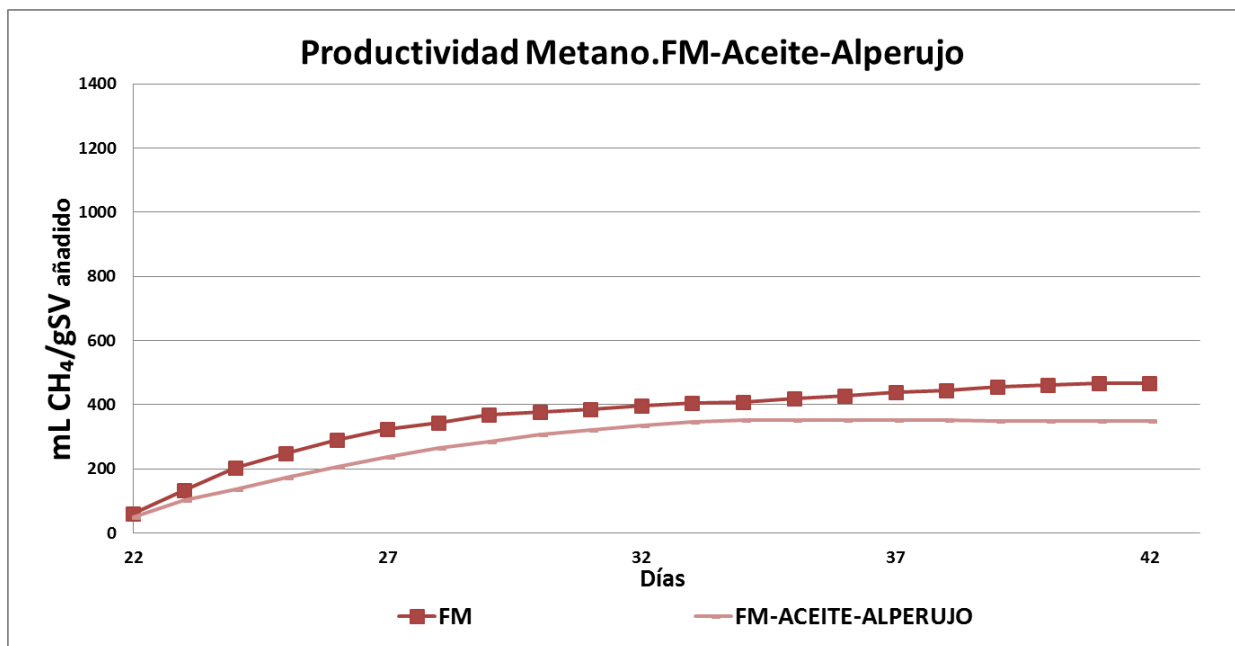
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de aceite y alperujo, de las distintas fases temporales.

La **fase 1**, corresponde con la gráfica 190. La productividad de metano en el ensayo de FM-Aceite-Alperujo es de  $342 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$  superior al ensayo del fango mixto que es de  $338 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ .



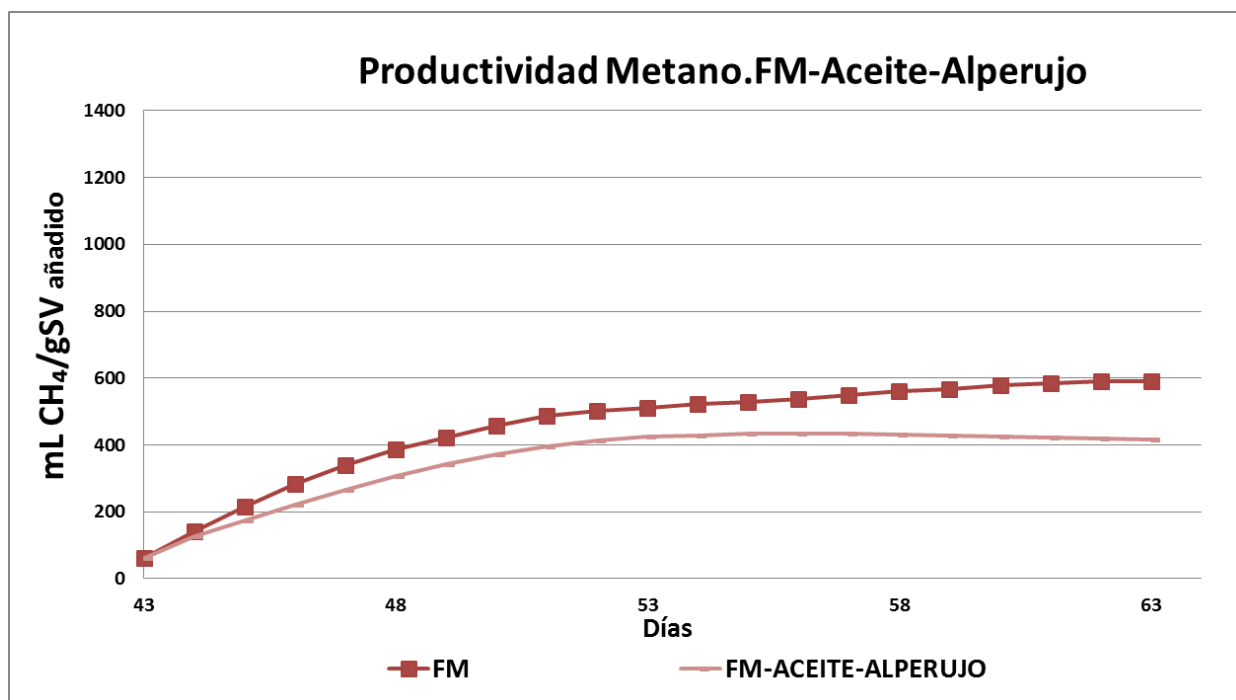
Gráfica 190. Productividad Metano FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

En la **fase 2** del ensayo de co-digestión anaerobia de fango mixto con mezcla de aceite y alperujo, la productividad de metano es de 348 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, e inferior al ensayo del fango mixto 466 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>). Tal y como se observa en la gráfica 191.



Gráfica 191. Productividad Metano FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

Como se observa en la gráfica 192, respecto a la **fase 3**. La productividad de metano en el ensayo de FM-Aceite-Alperujo, 416 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, es inferior a la del fango mixto 589 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 192. Productividad Metano FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

#### **5.4.6.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es similar en todas las fases, aumentando en la última fase. En la primera y segunda el porcentaje de metano en el ensayo de FM-Aceite-Alperujo es del 65%, un 5% menor, con respecto al ensayo del fango mixto (70%).

En la tercera fase, el porcentaje de metano en el ensayo de FM-Aceite-Alperujo es del 70%, mismo porcentaje respecto al ensayo del fango mixto (70%)

A la vista de los resultados, la adición de fangos mixtos de EDAR con mezcla de aceite y alperujo en una co-digestión anaerobia no ha conducido a un incremento en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al fango mixto debido a que son residuos de difícil tratamiento.



#### 5.4.7. Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de Aguas de Glicerina y Lixiviado

En este apartado, se han reunido los resultados analíticos del ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de glicerina y lixiviado. A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1**, los resultados analíticos se recogen en la tabla 104. El porcentaje de eliminación de DQO en el caso de la mezcla FM-Glicerina-Lixiviado es del 56%. La eliminación de los sólidos totales y sólidos volátiles es del 38% y 39% respectivamente. Cabe destacar que el porcentaje de materia volátil, es muy similar en la entrada y salida del ensayo. El pH final es de  $7,41 \pm 0,01$ , y, la relación AGV/ alcalinidad disminuye de un 0,23 hasta un 0,07.

Tabla 104. Ensayo FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

##### Fango Mixto-Glicerina-Lixiviado

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	22.290,41 ±0,72	9.890,32 ±0,76	56
ST	mg L <sup>-1</sup>	16.050,56 ±0,83	10.000,09 ±0,86	38
Materia Seca	%	1,61	1,00	
SV	mg L <sup>-1</sup>	9.540,11 ±0,86	5.840,26 ±0,90	39
Materia Volátil	%	59,44	58,40	
pH		7,00 ±0,01	7,41 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	16,99 ±0,02	16,00 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	2.800,48 ±1,08	6.304,77 ±1,04	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	631,38 ±1,03	471,96 ±0,98	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	757,66 ±1,03	565,66 ±0,98	
Relación AGV/Alcalinidad		0,23	0,07	

En la **fase 2**, se observa que el porcentaje de eliminación de materia orgánica en el ensayo de FM-Glicerina-Lixiviado es del 50%. La eliminación de los sólidos totales y sólidos volátiles es del 29% y 32% respectivamente. Cabe destacar que el porcentaje de materia volátil, es muy similar en la entrada y salida del ensayo. El pH final es de  $7,41 \pm 0,01$ , y, la relación AGV/ alcalinidad disminuye de un 0,20 hasta un 0,08. Tal y como se muestra en la tabla 105.

Tabla 105. Ensayo FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

#### Fango Mixto-Glicerina-Lixiviado

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	25.410,12±0,78	12.578,04±0,80	50
ST	mg L <sup>-1</sup>	19.780,52±0,80	13.987,46±0,85	29
Materia Seca	%	1,98	1,40	
SV	mg L <sup>-1</sup>	16.142,74±0,82	11.000,63±0,86	32
Materia Volátil	%	81,61	78,64	
pH		7,00±0,01	7,41±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	16,99±0,02	16,00±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	3.950,78±1,05	6.450,01±1,03	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	800,23±0,99	490,85±1,00	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	960,99±0,99	588,48±1,00	
Relación AGV/Alcalinidad		0,20	0,08	

La tabla 106 corresponde con la **fase 3** del ensayo, se observa que el porcentaje de eliminación de materia orgánica en el ensayo de FM-Glicerina-Lixiviado es del 49%. La eliminación de los sólidos totales y sólidos volátiles es del 29% y 27%, respectivamente. Cabe destacar que el porcentaje de materia volátil, es muy similar en la entrada y salida del ensayo. El pH final es de  $7,41 \pm 0,01$ , y, la relación AGV/ alcalinidad disminuye de un 0,21 hasta un 0,08.

Tabla 106. Ensayo FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

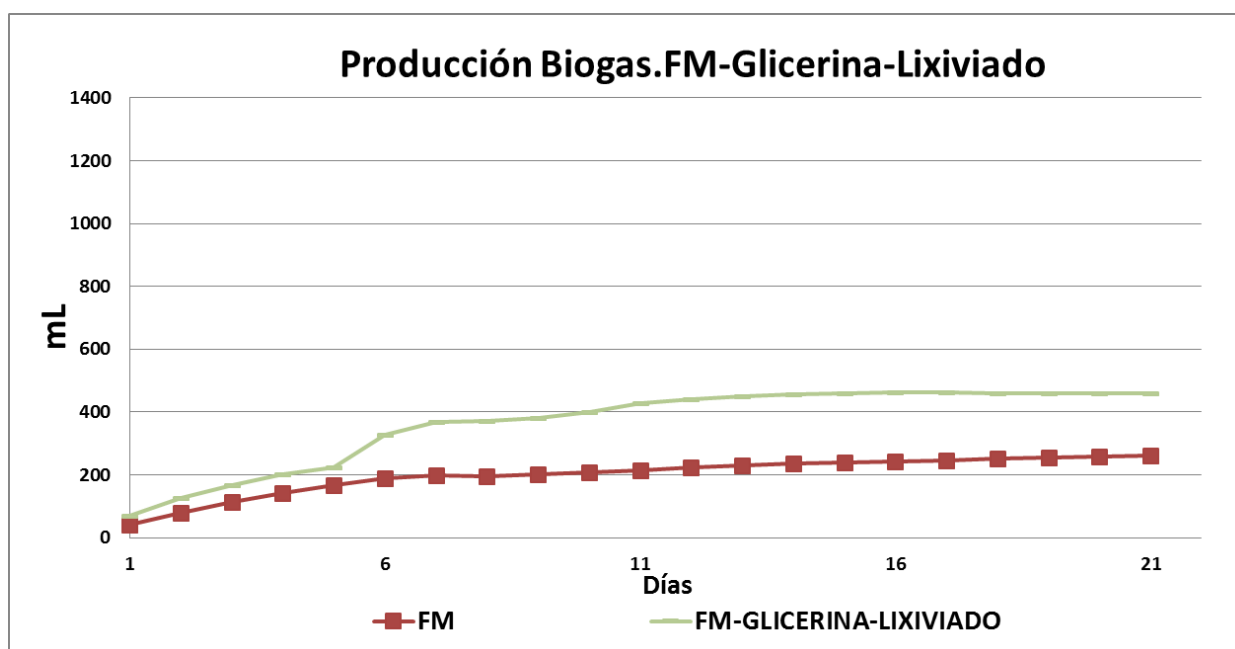
#### Fango Mixto-Glicerina-Lixiviado

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	23.800,12 ±0,78	12.025,48 ±0,80	49
ST	mg L <sup>-1</sup>	19.645,36 ±0,80	14.000,51 ±0,82	29
Materia Seca	%	1,96	1,40	
SV	mg L <sup>-1</sup>	15.460,20 ±0,82	11.254,38 ±0,80	27
Materia Volátil	%	78,70	80,39	
pH		7,00 ±0,01	7,41 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	16,99 ±0,02	16,00 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	2.980,42 ±1,00	6.400,70 ±1,02	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	630,56 ±0,95	480,50 ±0,90	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	756,47 ±0,95	576,40 ±0,90	
Relación AGV/Alcalinidad		0,21	0,08	

#### 5.4.7.1. Producción de Biogás

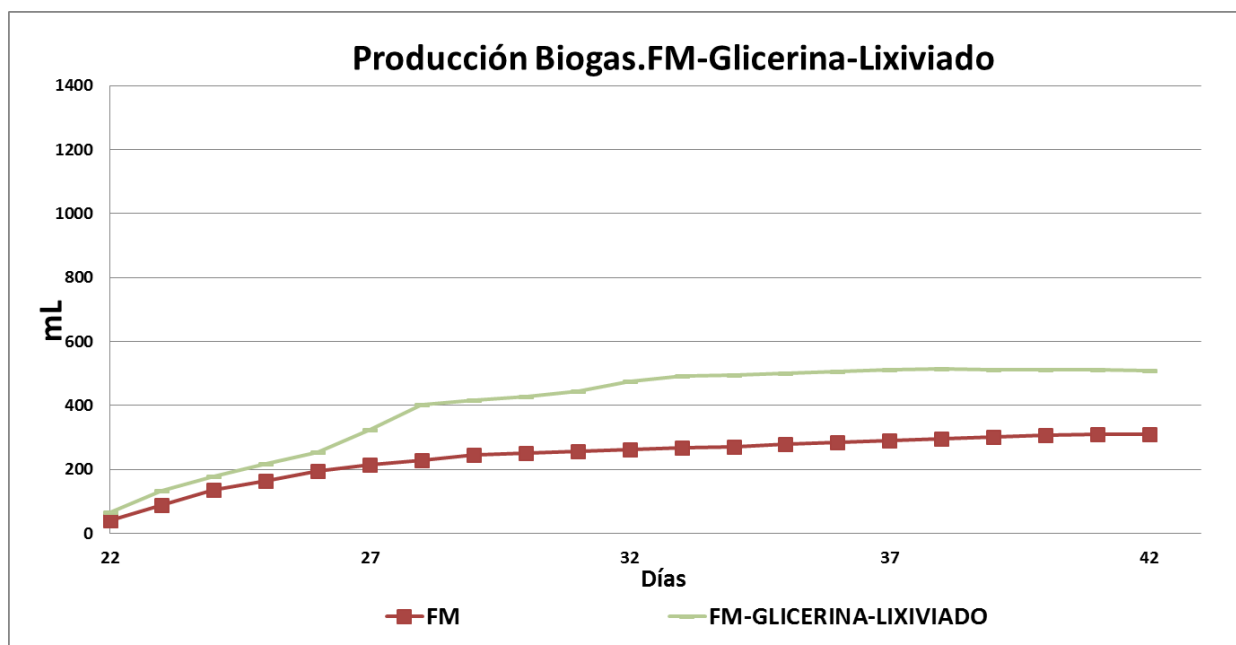
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales del ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de glicerina y lixiviado. Cabe destacar, una clara diferencia en la parte inicial de la curva del inóculo, frente a la curva del ensayo de fangos mixtos de EDAR con mezcla de glicerina y lixiviado.

En la **fase 1**, tal y como se representa en la gráfica 193, el ensayo de FM-Glicerina-Lixiviado presenta un crecimiento similar al ensayo del fango mixto hasta el día 5, a partir del cual muestra un crecimiento exponencial hasta el día 7, en el que se estabiliza. La producción total de biogás del FM-Glicerina-Lixiviado es de 458mL y, la del fango mixto 261mL, incrementando la producción en 197mL.



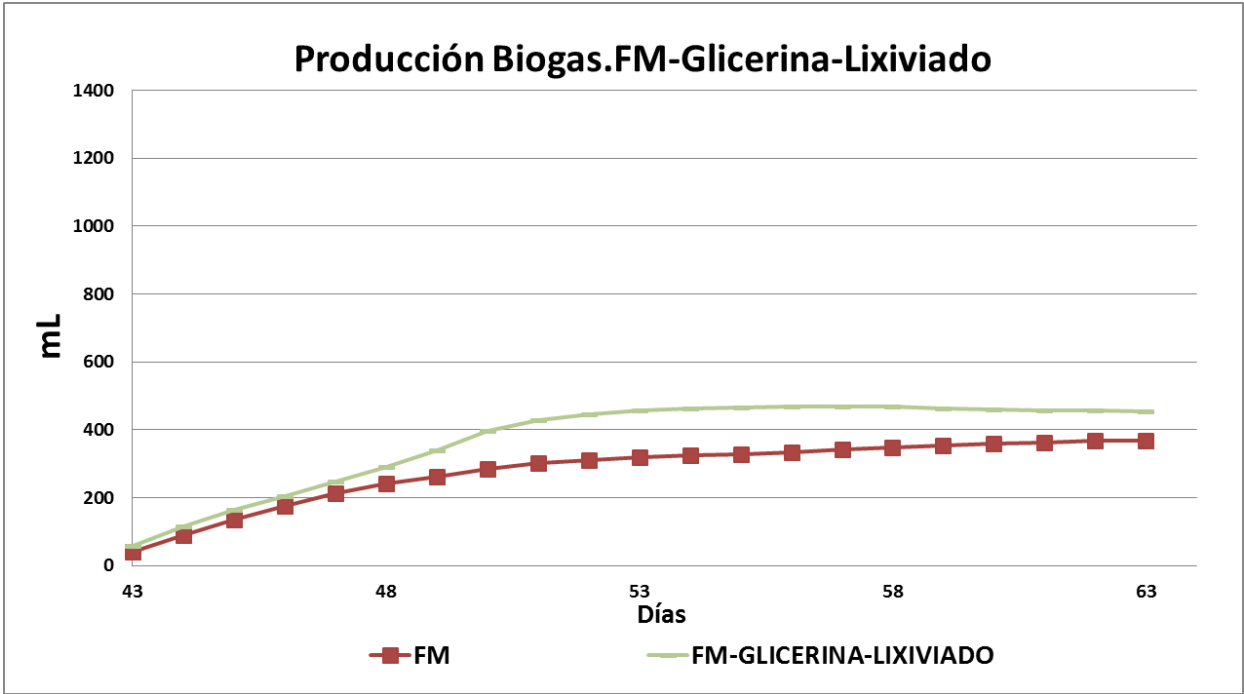
Gráfica 193. Producción Biogás FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

En la **fase 2**, el ensayo de FM-Glicerina-Lixiviado presenta un crecimiento similar al ensayo fango mixto hasta el día 26, a partir del cual muestra un crecimiento exponencial hasta el día 28, en el que se estabiliza. La producción total de biogás del FM-Glicerina-Lixiviado es de 510 mL y, la del fango mixto 309 mL, incrementando la producción en 201 mL. Tal y como se representa en la gráfica 194.



Gráfica 194. Producción Biogás FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

En la **fase 3**, el ensayo de FM-Glicerina-Lixiviado presenta un crecimiento similar al fango mixto hasta el día 48, a partir del cual muestra un crecimiento exponencial hasta el día 50, en el que se estabiliza. Tal y como se representa en la gráfica195, la producción total de biogás del FM-Glicerina-Lixiviado es de 455 mL y la del fango mixto 367 mL, incrementando la producción en 88 mL

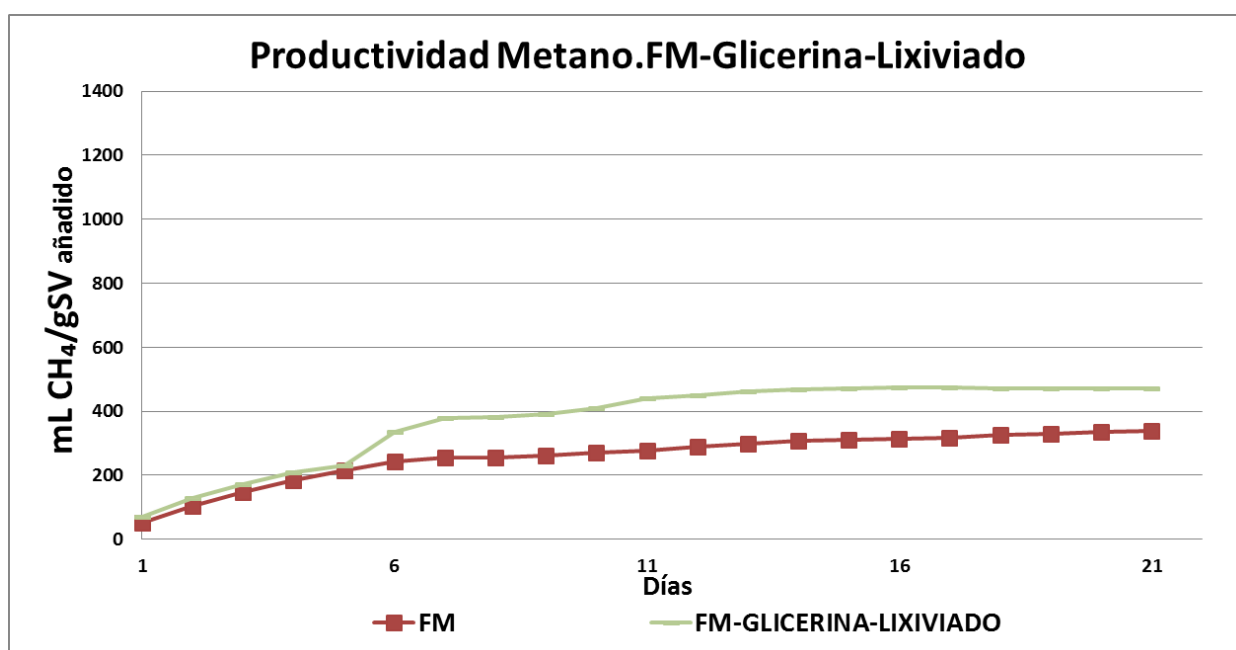


Gráfica 195. Producción Biogás FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

### 5.4.7.2. Productividad de Metano

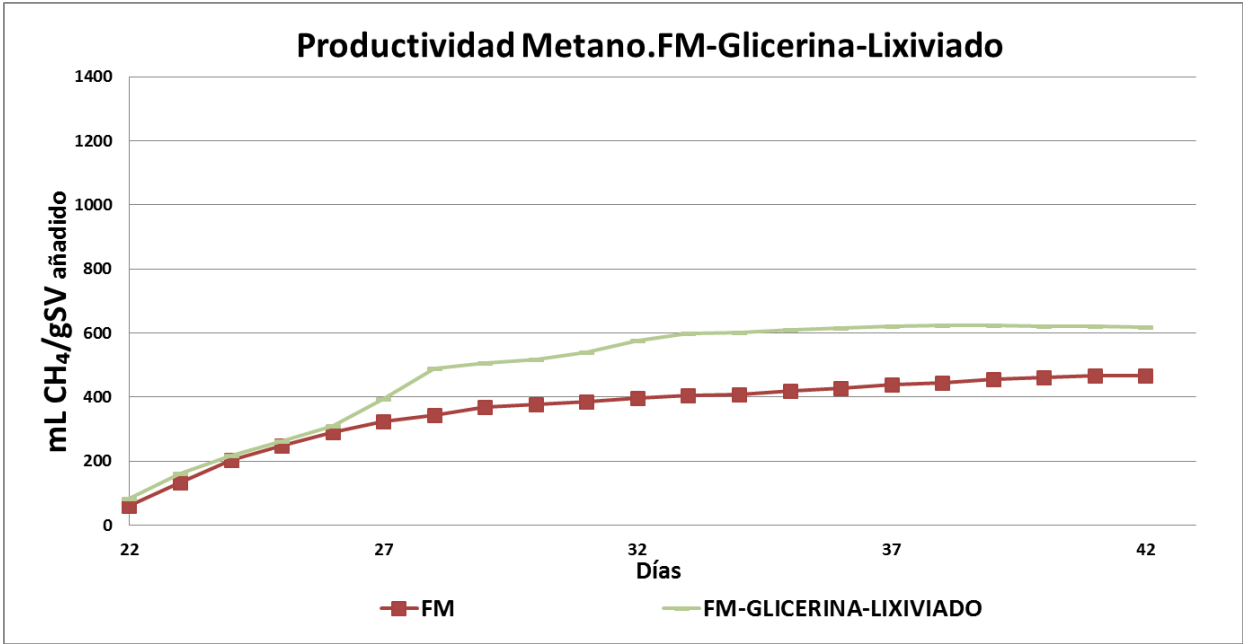
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para el ensayo de co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de glicerina y lixiviado, de las distintas fases temporales.

En la **fase 1**, la productividad de metano en el ensayo de FM-Glicerina-Lixiviado es de 470 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, como se representa en la gráfica 196.



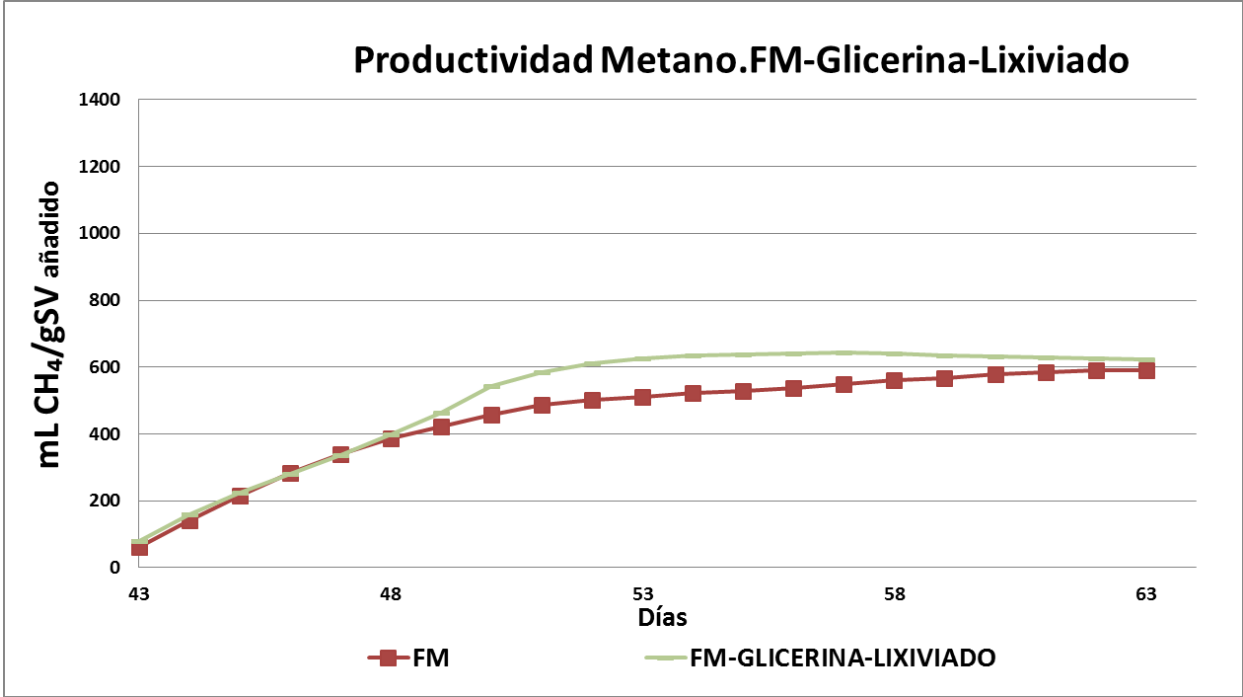
Gráfica 196.Productividad Metano FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

La productividad de metano en la **fase 2** del ensayo de FM-Glicerina-Lixiviado es de 619 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, como se observa en la gráfica 197.



Gráfica 197. Productividad Metano FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

Como se observa en la gráfica 198 que corresponde con la **fase 3**, la productividad de metano en el ensayo de FM-Glicerina-Lixiviado es de 624 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 198. Productividad Metano FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3



#### **5.4.7.3. Evolución del metano en el biogás**

Con respecto a la evolución observada para el porcentaje de metano en las distintas fases, se puede destacar el hecho de que es similar en todas las fases, aumentando ligeramente al transcurso de cada fase temporal.

En la primera fase, el porcentaje de metano en el ensayo de FM-Glicerina-Lixiviado es del 63%, un 7% menor, con respecto al ensayo del fango mixto (70%). En la segunda fase, el porcentaje de metano en el ensayo de FM-Glicerina-Lixiviado es del 65%, un 10% menor con respecto al ensayo del fango mixto (75%). En la tercera y última fase, el porcentaje de metano en el ensayo de FM-Glicerina-Lixiviado es del 67%, un 3% menor, con respecto al ensayo del fango mixto (70%).

A la vista de los resultados, la adición de fangos mixtos de EDAR con mezcla de cascara arroz y lixiviado en una co-digestión anaerobia ha conducido a un incremento en la producción de biogás y en la productividad de metano, respecto al fango mixto. A pesar de que la glicerina y el lixiviado son residuos de difícil tratamiento.

#### **5.4.8. Comparación ensayo de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica.**

##### **5.4.8.1. Comparación ensayo de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica. Fase 1 (21 Días)**

Una vez estudiados las mezclas de dos residuos en digestión anaerobia. Este capítulo trata de ver cómo se comportan con fangos mixtos para optimizar la gestión de residuos y la obtención de biogás.

**La producción de biogás** correspondientes ensayos de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica, respecto a la fase 1, se han representado en la gráfica 199.

En los casos donde el suero se ha empleado como sustrato para mejorar el comportamiento de los residuos que son difícilmente biodegradable, se puede observar claramente, que la mezcla FM-SueroB-Alperujo es el que presenta mayor producción de biogás 777 mL. Las aguas de Glicerina junto con el suero y el fango mixto (FM-Glicerina-SueroB) tiene una producción de biogás total de 503 mL, menos La mezcla de FM-Lixiviado-SueroB genera un volumen total de biogás de 346 mL. La adición del suero a los residuos inestables mejora la producción de biogás.

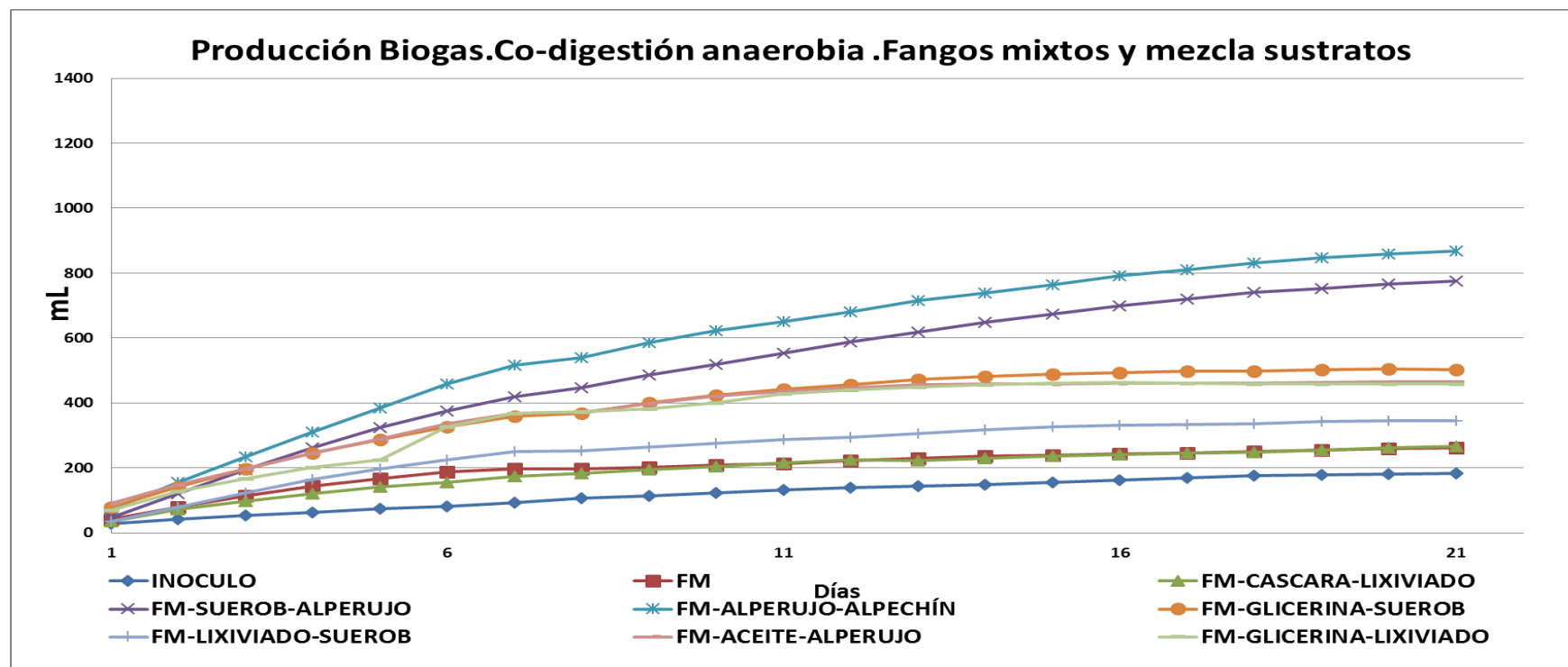
La mezcla de dos residuos inestables como son el lixiviado y las aguas de glicerina, junto con el fango mixto tiene una producción de biogás de 458 mL, siendo una vía muy prometedora para gestionar dos residuos de difícil gestión.

Para afrontar la realidad diaria de una fábrica de aceite de oliva, se mezcla los residuos que se generan Alperujo-Alpechín junto con el fango mixto, esta mezcla presenta una producción de biogás de 868 mL.

El FM-Aceite-Alperujo y la mezcla tiene una producción total de biogás similar, 466mL La mezcla FM-Cascara-Lixiviado (266mL) presenta una producción total similar al fango mixto (261 mL). Todas las mezclas de residuos, a diferencia del FM-Cascara-Lixiviado, tienen una producción de biogás superior al fango mixto. El inóculo presenta un volumen total de 182 mL.

Con respecto al porcentaje de **eliminación de materia orgánica**, como se puede observar en la tabla 107, todos los residuos presentan una eliminación de DQO por encima del inóculo, siendo muy significativo el porcentaje de eliminación del FM-SueroB-Alperujo y FM-Alperujo-Alpechín, 61% y 60%, respectivamente. Cabe destacar, que el porcentaje de eliminación de DQO de la mezcla FM-Cascara-Lixiviado (48%), FM-Aceite-Alperujo (49%), FM-Lixiviado-SueroB (51%), FM-Glicerina-SueroB (52%) y FM-Glicerina-Lixiviado (565), presentan una eliminación por debajo del fango mixto (59).

En cuanto al porcentaje de **eliminación de sólidos**, cabe destacar el bajo porcentaje de eliminación de sólidos volátiles de la mezcla de FM-Cascara-Lixiviado (26%). Por el contrario, el FM-SueroB-Alperujo es la mezcla de residuos que presenta un mayor porcentaje de eliminación de SV (59%).



Gráfica 199. Producción Biogás, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

Tabla 107. Porcentajes Eliminación y Producción Biogás, Co-digestión de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

		Inóculo	Fango Mixto	FM-Cascara-Lixiviado	FM-SueroB-Alperujo	FM-Alperujo-Alpechín	FM-Glicerina-SueroB	FM-Lixiviado-SueroB	FM-Aceite-Alperujo	FM-Glicerina-Lixiviado
DQO	%	28	59	48	61	60	52	51	49	56
ST	%	26	34	32	31	39	30	40	30	38
SV	%	21	32	26	55	39	32	31	37	39
P de Biogás	mL	182	261	266	777	868	503	346	466	458

#### **5.4.8.2. Comparación ensayo de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica. Fase 2 (42 Días)**

Una vez estudiados las mezclas de dos residuos en digestión anaerobia. Este capítulo trata de ver cómo se comportan con fangos mixtos para optimizar la gestión de residuos y la obtención de biogás, en una segunda fase.

**La producción de biogás** correspondientes ensayos de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica, respecto a la fase 2 con fango adaptado a la mezcla residuos procedentes de la fase 1, se han representado en la gráfica 200.

En los casos donde el suero se ha empleado como sustrato para mejorar el comportamiento de los residuos que son difícilmente biodegradable, se puede observar claramente, que la mezcla FM-SueroB-Alperujo es el que presenta mayor producción de biogás 893 mL. Las aguas de Glicerina junto con el suero y el fango mixto (FM-Glicerina-SueroB) tiene una producción de biogás total de 551 mL, menos La mezcla de FM-Lixiviado-SueroB genera un volumen total de biogás de 354 mL. La adición del suero a los residuos inestables mejora la producción de biogás.

La mezcla de dos residuos inestables como son el lixiviado y las aguas de glicerina, junto con el fango mixto tiene una producción de biogás de 510 mL, siendo una vía muy prometedora para gestionar dos residuos de difícil gestión.

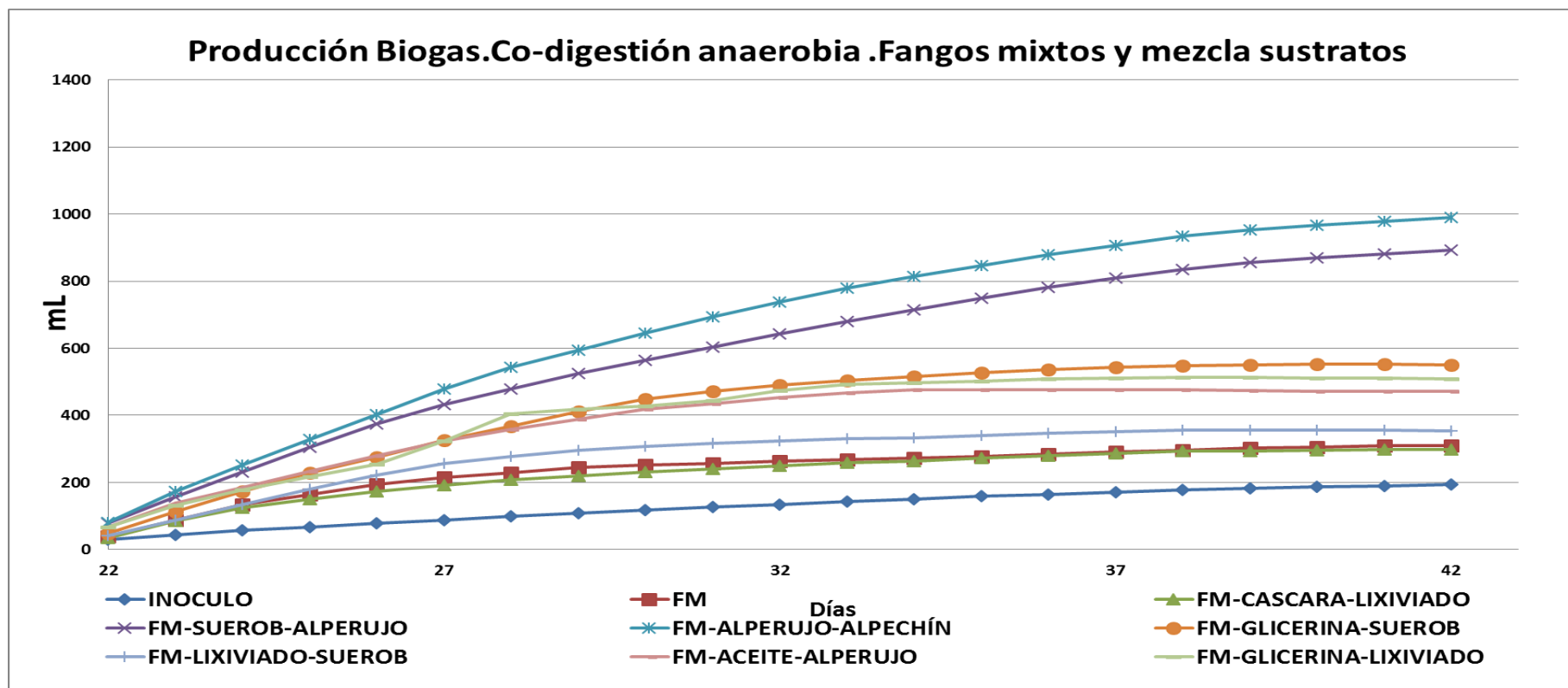
Para afrontar la realidad diaria de una fábrica de aceite de oliva, se mezcla los residuos que se generan Alperujo-Alpechín junto con el fango mixto, esta mezcla presenta una producción de biogás de 989 mL.

El FM-Aceite-Alperujo y la mezcla tiene una producción total de biogás similar, 472mL La mezcla FM-Cascara-Lixiviado (298mL) presenta una producción total similar al fango mixto (309 mL). Todas las mezclas de residuos, a diferencia del FM-Cascara-Lixiviado, tienen una producción de biogás superior al fango mixto. El inóculo presenta un volumen total de 193 mL.

En términos de porcentaje de **eliminación de materia orgánica**, como se puede observar en la tabla 108, todos los residuos presentan una eliminación de DQO por encima del inóculo, siendo muy significativo el porcentaje de eliminación del FM-SueroB-Alperujo

y FM-Alperujo-Alpechín, 55% y 57%, respectivamente. Cabe destacar que el porcentaje de eliminación de DQO, de la mezcla FM-Cascara-Lixiviado (46%), FM-Aceite-Alperujo (47%), FM-Lixiviado-SueroB (48%) y FM-Glicerina-Lixiviado (50%), presentan una eliminación por debajo del fango mixto (51%)

Con respecto al porcentaje de **eliminación de sólidos**, cabe destacar el bajo porcentaje de eliminación de sólidos totales de la mezcla de FM-Lixiviado-SueroB (26%). Por el contrario, el FM- Alperujo-Alpechín es la mezcla de residuos que presenta un mayor porcentaje de eliminación de SV (40%).



Gráfica 200.Producción Biogás, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

Tabla 108.Porcentajes Eliminación y Producción Biogás, Co-digestión de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

		Inóculo	Fango Mixto	FM-Cascara-Lixiviado	FM-SueroB-Alperujo	FM-Alperujo-Alpechín	FM-Glicerina-SueroB	FM-Lixiviado-SueroB	FM-Aceite-Alperujo	FM-Glicerina-Lixiviado
DQO	%	19	51	46	55	57	52	48	47	50
ST	%	27	34	31	39	39	34	26	35	29
SV	%	26	34	25	39	40	36	37	33	32
P de Biogás	mL	193	309	298	893	989	551	354	472	510

#### **5.4.8.3. Comparación ensayo de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica. Fase 3 (63 Días)**

Una vez estudiados las mezclas de dos residuos en digestión anaerobia. Este capítulo trata de ver cómo se comportan con fangos mixtos para optimizar la gestión de residuos y la obtención de biogás, en una tercera fase.

**La producción de biogás** correspondientes ensayos de Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica, respecto a la fase 3 con fango adaptado a la mezcla residuos procedentes de la fase 2, se han representado en la gráfica 209.

En los casos donde el suero se ha empleado como sustrato para mejorar el comportamiento de los residuos que son difícilmente biodegradable, se puede observar claramente, que la mezcla FM-SueroB-Alperujo es el que presenta mayor producción de biogás 1.001 mL. Las aguas de Glicerina junto con el suero y el fango mixto (FM-Glicerina-SueroB) tiene una producción de biogás total de 568 mL, menos La mezcla de FM-Lixiviado-SueroB genera un volumen total de biogás de 392 mL. La adición del suero a los residuos inestables mejora la producción de biogás.

La mezcla de dos residuos inestables como son el lixiviado y las aguas de glicerina, junto con el fango mixto tiene una producción de biogás de 455 mL, siendo una vía muy prometedora para gestionar dos residuos de difícil gestión.

Para afrontar la realidad diaria de una fábrica de aceite de oliva, se mezcla los residuos que se generan Alperujo-Alpechín junto con el fango mixto, esta mezcla presenta una producción de biogás de 1.021 mL.

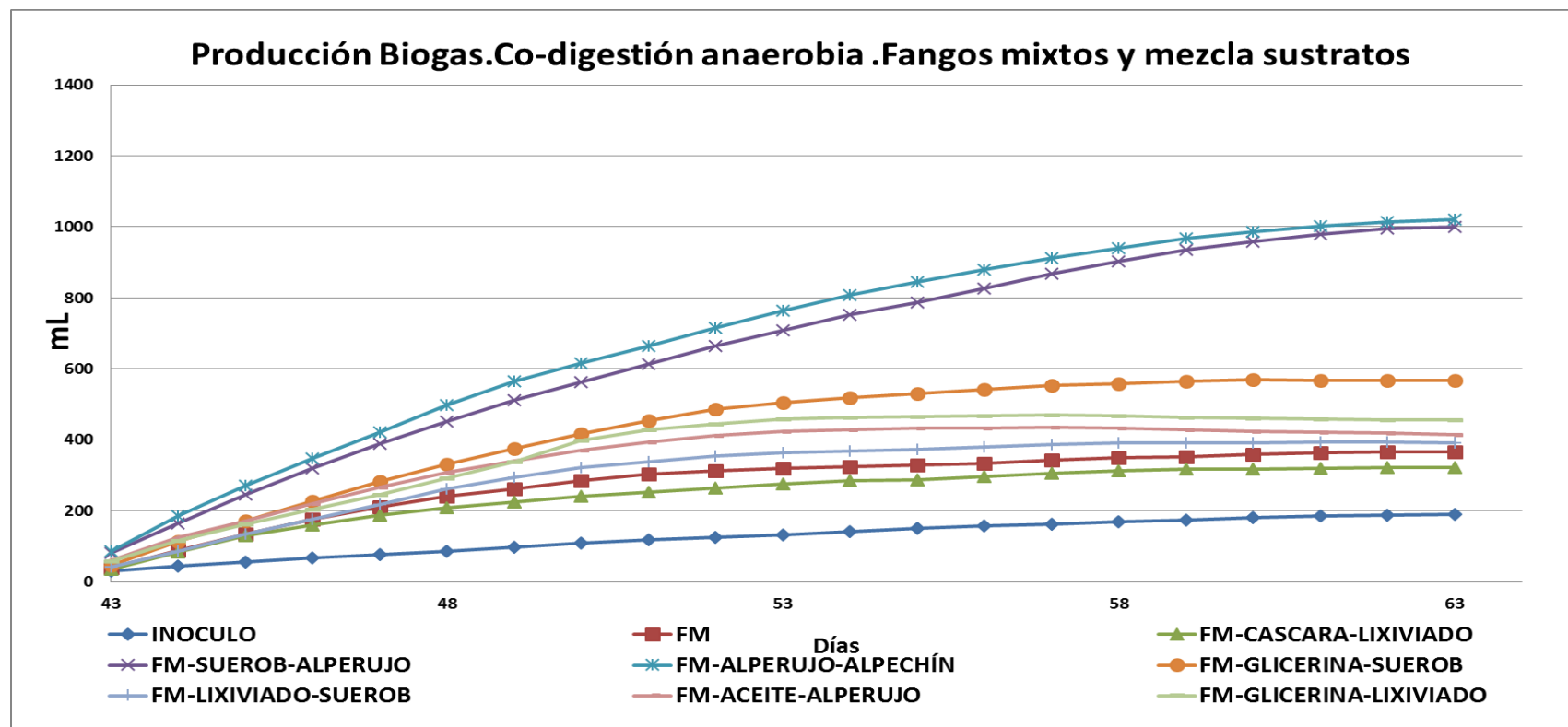
El FM-Aceite-Alperujo y la mezcla tiene una producción total de biogás similar, 416mL La mezcla FM-Cascara-Lixiviado (323mL) presenta una producción total similar al fango mixto (367 mL). Todas las mezclas de residuos, a diferencia del FM-Cascara-Lixiviado, tienen una producción de biogás superior al fango mixto. El inóculo presenta un volumen total de 191 mL.

Con respecto al porcentaje de **eliminación de materia orgánica**, como se puede observar en la tabla 109, todos los residuos presentan una eliminación de DQO por encima del inóculo, siendo muy significativo el porcentaje de eliminación del FM-SueroB-Alperujo



y FM-Alperujo-Alpechín, 57% y 60%, respectivamente. Cabe destacar que, el porcentaje de eliminación de DQO de la mezcla FM-Cascara-Lixiviado (45%), FM-Lixiviado-SueroB (45%) FM-Glicerina-Lixiviado (49%), y FM-Glicerina-SueroB (49%), presentan una eliminación por debajo del fango mixto (51%).

En términos de **eliminación de sólidos**, cabe destacar el poco porcentaje de eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles de la mezcla de FM-Glicerina-Lixiviado, 29% y 27%, respetivamente. Por el contrario, el FM-Alperujo-Alpechín y el FM-SueroB-Alperujo son las mezclas de residuos que presentan un mayor porcentaje de eliminación de SV (39%).

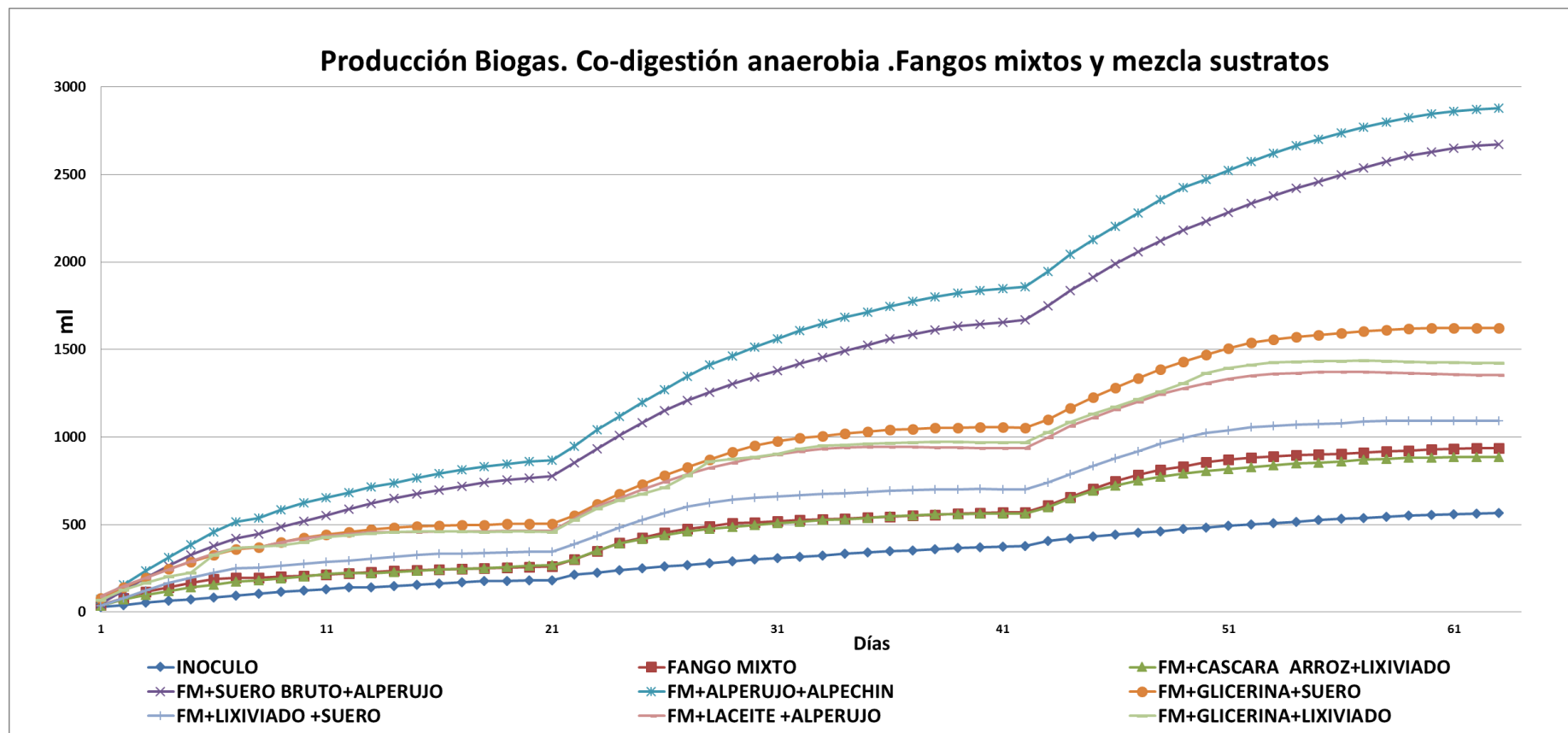


Gráfica 201. Producción Biogás, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

Tabla 109. Porcentajes Eliminación y Producción Biogás, Co-digestión de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

		Inóculo	Fango Mixto	FM-Cascara-Lixiviado	FM-SueroB-Alperujo	FM-Alperujo-Alpechín	FM-Glicerina-SueroB	FM-Lixiviado-SueroB	FM-Aceite-Alperujo	FM-Glicerina-Lixiviado
<b>DQO</b>	%	15	51	45	57	60	49	45	51	49
<b>ST</b>	%	18	33	30	39	38	30	31	34	29
<b>SV</b>	%	23	37	28	39	39	35	35	33	27
<b>P de Biogás</b>	mL	191	367	323	1001	1021	568	392	416	455

#### 5.4.8.4. Comparación ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase (1, 2 y 3)



Gráfica 202. Producción Biogás. Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica

Tabla 110. Producción Biogás. Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica

Producción Biogás	Inóculo	Fango Mixto	FM-Cascara-Lixiviado	FM-SueroB-Alperujo	FM-Alperujo-Alpechín	FM-Glicerina-SueroB	FM-Lixiviado-SueroB	FM-Aceite-Alperujo	FM-Glicerina-Lixiviado
<b>Fase 1</b>	182	261	266	777	868	503	346	466	458
<b>Fase 2</b>	193	309	298	893	989	551	354	472	510
<b>Fase 3</b>	191	367	323	1001	1021	568	392	416	455
<b>Producción Total</b>	566	937	887	2670	2879	1622	1092	1353	1423

Es importante mencionar que la adición de la mezcla cascara de arroz y lixiviado junto al fango mixto, presenta una producción de biogás similar, con el transcurso de cada fase temporal, la producción de biogás va mejorando. A pesar de que el lixiviado es un residuo complejo y la cascara de arroz es difícil de biodegradar.

La uso del residuo procedente de la industria láctea, como sustrato que enmiende el comportamiento y la producción de biogás de residuos inestables. Como se puede observar en gráfica 202, La adición suero es muy viable.

La adición de la mezcla de suero y agua glicerosas junto con el fango mixto, presenta una producción de biogás similar en todas las fases, aumentando en las dos últimas la producción, la mezcla de estos residuos aporta estabilidad al proceso de producción de biogás. Del mismo modo, la mezcla de suero con el lixiviado y el fango mixto presenta una producción de biogás similar en todas las fases, disminuyendo la complejidad del lixiviado. Además, la mezcla del suero con el alperujo y el lodo de depuradora, presenta una producción de biogás en las tres fases temporales del ensayo muy significativa.

La mezcla de los residuos procedentes de la fabricación de aceite de oliva, alperujo y alpechín presenta una magnífica adaptación en una digestión anaerobia, aumentando la producción de biogás al transcurso de las fases del ensayo. Siendo la mezcla de residuos más productiva de todas del presente ensayo.

Las aguas de glicerina junto con el lixiviado y el fango mixto en una co-digestión anaerobia, presenta un buen arranque en la producción de biogás. La producción e biogás en las fases temporales del ensayo es prácticamente similar, confirma este buen comportamiento, que abre posibilidades inesperadas previamente de la mezcla de residuos poco biodegradables.

#### **5.4.9. Conclusiones ensayo de Co-digestión anaerobia de fango mixto de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica.**

En general, la mezcla de residuos agroalimentarios e industriales junto al fango mixto en un proceso de co-digestión anaerobia, son viables para su aprovechamiento energético y gestión de residuos, siendo una magnífica herramienta de trabajo.

La adición de fango mixto y suero a residuos de difícil tratamiento mejora la producción de biogás y su tratabilidad.

La mezcla de residuos de la industria de la fabricación de aceite de oliva en un solo residuo junto al fango mixto aumenta significativamente la producción de biogás. La mezcla de residuos reduce la problemática medioambiental del alpechín, siendo una buena posibilidad de tratamiento para las balsas de evaporación de las empresas del olivar.

Las aguas de glicerina junto con el lixiviado y el fango mixto, abre posibilidades inesperadas para la gestión de residuos de difícil, en una EDAR.

## **Capítulo 6**

---

### **Conclusión**





## 6. Conclusión

Las conclusiones globales obtenidas en los distintos ensayos realizados, parten de las hipótesis iniciales:

1. Es posible la utilización de residuos en los digestores de una EDAR.
2. Es posible establecer el estudio de la digestión anaerobia en digestores piloto, mediante la tecnología BMP.
3. Es posible el tratamiento de residuos de difícil gestión, perjudiciales para el medio ambiente, como sustratos o co-sustratos en un proceso de digestión anaerobia.
4. Es posible aprovechar residuos de difícil gestión, perjudiciales para el medio ambiente, generando un incremento o mejorando la producción de biogás, en una digestión y co-digestión anaerobia.
5. Es estudiar la complementariedad de residuos inestables con otros sustratos estables o no, de forma que se puedan aprovechar la mayor cantidad de residuos orgánicos agroalimentarios e industriales.

En este estudio se ha validado una metodología para determinar la biodegradabilidad anaerobia de residuos orgánicos basada en protocolos existentes. Esta metodología ha permitido cuantificar el potencial de producción de biogás y productividad de metano de nueve residuos distintos mediante el ensayo de **digestión anaerobia mono-sustrato**.

La digestión anaerobia de residuos es viable en la mayoría de los sustratos orgánicos estudiados (alperujo, aceite usado de cocina, suero bruto, suero ácido, alpechín, y el fango mixto), siendo inestable en la cascara de arroz debido a que es difícil de biodegradar, y en el ensayo de aguas glicerosas. El inconveniente de este residuo es la presencia de sales de sulfato a partir de las cuales se puede producir ácido sulfhídrico, que afecta negativamente tanto al proceso anaerobio como a los equipos de cogeneración.

El ensayo con el lixiviado, se puede concluir que su utilización en una digestión anaerobia no es factible siendo bastante compleja su tratabilidad.

Con respecto a los ensayos de biodegradabilidad de **co-digestión anaerobia de fango mixto y residuos orgánicos** reflejan las ventajas de añadir un co-sustrato junto al fango mixto de EDAR en términos de rendimientos metanogénicos.

Los residuos de alta carga orgánica como el alperujo, suero bruto y suero ácido aumentan significativamente la producción de biogás. En el caso del alpechín no presenta un aumento significativo en el potencial metanogénico, pero al ser un residuo contaminante, resulta beneficioso su tratamiento en co-digestión.

Las aguas de glicerina presentan problemas de estabilidad en el proceso de co-digestión. Los lixiviados de vertedero tienen un comportamiento inestable, depende mucho de su antigüedad en el vertedero, por lo que su ensayo es necesario.

En el ensayo de **digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos** reflejan las ventajas de añadir sustratos que enmienden el comportamiento de ciertos residuos difícilmente degradables.

La adición de suero a residuos de difícil tratamiento mejora la producción de biogás y su tratabilidad. La mezcla de residuos de la industria de la fabricación de aceite de oliva en un solo residuo aumenta notoriamente la producción de biogás. Esta mezcla reduce la problemática medioambiental del alpechín, siendo una buena posibilidad de tratamiento para las balsas de evaporación de las empresas del olivar. La viabilidad del ensayo de las aguas glicerosas junto con el lixiviado abre posibilidades inesperadas para la gestión de residuos de difícil tratamiento.

Con respecto a los ensayos de biodegradabilidad de **co-digestión anaerobia de fango mixto de EDAR con la mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica** reflejan los beneficios de añadir la mezcla de dos sustratos junto al fango mixto de EDAR, que incrementa el potencial de producción de biogás y la productividad de metano.

La adición de fango mixto de EDAR junto con el suero a residuos de difícil tratamiento mejora la producción de biogás y su tratabilidad. La mezcla de residuos de la industria de la fabricación de aceite de oliva junto al fango mixto aumenta significativamente la producción de biogás. El ensayo de las aguas glicerosas junto con el lixiviado y el fango mixto es viable, mostrando posibilidades inesperadas para la gestión de residuos de difícil, en una EDAR.

A pesar que de los beneficios de la mezclas de residuos tanto en digestión como en co-digestión se deben estudiar previamente la viabilidad de cada uno de ellos en particular.

Con la amplia gama de residuos estudiados ofrece la posibilidad de hacer un manual de gestión que vaya aumentando con nuevas investigaciones. Así los gestores de las EDAR y empresas generadoras de residuos, tienen disponible una herramienta importante para la toma de decisiones.



## **Capítulo 7**

---

### **Futuras líneas de investigación**



## **7. Futuras líneas de investigación**

A continuación se detallan las futuras líneas de investigación en las que es posible continuar el trabajo a que se ha dado comienzo en este proyecto:

Ampliación de la línea de investigación en digestores piloto de laboratorio, tanto en procesos continuos como discontinuos, con distintos residuos o mezclas de residuos de difícil gestión. Con el fin de crear una herramienta que ayude a operar plantas reales de co-digestión que permita maximizar la producción de metano.

Crear una base de datos de residuos que en un futuro constituya un manual de gestión en la digestión y co-digestión anaerobia con residuos orgánicos agroalimentarios e industriales.

Estudio de las características y poblaciones bacterianas de los residuos que muestran potencial como estabilizadores y reparadores de sistemas no funcionales. Estudio de su composición y organismos, demostración de los mecanismos utilizados para estabilizar el proceso anaerobio desde unas condiciones poco idóneas.

Estudio de las características de los fangos obtenidos en el proceso de digestión anaerobia, mediante un estudio de la tratabilidad. Características en su composición, estabilidad y aprovechamiento en campos de cultivo como compost o mejora de suelos.





## **Capítulo 8**

---

### **Bibliografía**



## 8. Bibliografía

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2012). EEA Señales, “Crear el futuro deseado”. Recuperado de: <http://www.eea.europa.eu/es>.
- Agencia Andaluza de Energía. (2015). La biomasa y el biogás en Andalucía. Recuperado de: <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/>.
- Ahring, B.K., Sandberg, M., Angelidaki, I. (1995). Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors. *Applied Microbiology and Biotechnology* 43(3), 559-565.
- Alatrisme-Mondragon, F., Samar, P., Cox, H.H.J., Ahring, B.K., Iranpour, R. (2006). Anaerobic codigestion of municipal, farm, and industrial organic wastes: A survey of recent literature. *Water Environment Research* 78(6), 607-636.
- Alba Mendoza, J. 1994b. El orujo de aceituna: evolución, estado actual y perspectivas. *Agricultura* 746, 812-814.
- Alvarez, R., Lidén, G. (2008). Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste. *Renewable Energy* 33(4), 726-734.
- Alvarez, J.A., Carballa, M., Regueiro, L., Lema, J. M. (2010). Anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes. *Proceedings of the 12th World Congress on Anaerobic Digestion IWA Specialized Conference, Guadalajara, Méjico, 31 octubre-4 noviembre, 2010*.
- Angelidaki I., Ellegaard L., Ahring B.K. (1993). A mathematical model for dynamic simulation of anaerobic digestion of complex substrates, focusing on ammonia inhibition. *Biotechnology and Bioenergy* 42,159-166.
- Angelidaki, I., Ahring, B.K. (1997). Co-digestion of olive oil mill wastewaters with manure, household waste or sewage sludge. *Biodegradation* 8(4), 221-226.
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J.L., Guwy, A.J., et al. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology* 59, 927-934.

- APHA-AWW-WOCF, (1992), Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, 17ª edición.
- Appels, L., Baeyens, J., Degrevé, J., Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science* 34(6), 755-781.
- Archer, D.B. y Kirsop, B.H. (1990). "The microbiology and control of anaerobic digestion". *Anaerobic digestion: a waste treatment technology*, Wheatley A., ed., Elsevier applied science, 43-87.
- Astals, S., Nolla-Ardèvol, V., Mata-Alvarez, J. (2012). Anaerobic co-digestion of pig manure and crude glycerol at mesophilic conditions: Biogas and digestate. *Bioresource Technology* 110(0), 63-70.
- Aznar, R. y Jimenez, F. (1993a). "Digestión anaerobia de efluentes agroindustriales I". *Tecnoambiente*, 26, 85-92.
- Aznar, R. y Jimenez, F. (1993b). "Digestión anaerobia de efluentes agroindustriales II". *Tecnoambiente*, 27, 35-39.
- Birch, R., Biver, C., Campagna, R., Gledhill, W., Pagga, U., Steber, J., Reust, H. (1989). Bontinck W. Screening of chemicals for anaerobic biodegradability. *Chemosphere* 19(10-11), 1527-1550.
- Björnsson, L., Murto, M., Mattiasson, B. (2000). Evaluation of parameters for monitoring an anaerobic codigestion process. *Applied Microbiology and Biotechnology* 54(6), 844-849.
- Buendía, I.M., Fernández, F.J., Villaseñor, J., Rodríguez, L. (2009). Feasibility of anaerobic co-digestion as a treatment option of meat industry wastes. *Bioresource Technology* 100(6), 1903-1909.
- Cadi, Z. (1994). "Méthanisation en bioréacteur à membrane: application a effluent de papeterie", Tesis doctoral, Université Claude Bernard (Lyon).
- Calli, B., Mertoglu, B., Inanc, B., Yenigun, O. (2005). Effects of high free ammonia concentrations on the performances of anaerobic bioreactors. *Process Biochemistry* 40, 1285-1292.

- Dague, R.R., Habben, C.E. y Pidaparti, S.R. (1992). "Initial studies on the anaerobic sequencing batch reactor". *Water Science and Technology*, 26 (9), 2429-2432.
- Dai, X., Duan, N., Dong, B., Dai, L. (2013). High-solids anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in comparison with mono digestions: Stability and performance. *Waste Management* 33(2), 308-316.
- Dasari, M.A., P.P. Kiatsimkul, W.R. Sutterlin, and G.J. Suppes. 2005. Low-pressure hydrogenolysis of glycerol to propylene glycol. *Applied Catalysis A: General* 281(1-2): 225-231.
- Degremont Iberia. 2011. El factor clave del tratamiento de fangos, "La energía". Recuperado de: <http://www.degremont.es/es/images/pdf/tratamientofangos.pdf>.
- Directiva 91/271/CEE Directiva del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas
- Dolphin, J. (1988). "Acetogénesis". *Biology of anaerobic microorganisms*, Zehnder A.J.B. ed., 417-468.
- Donoso, A., M. Carballa, G. Ruiz and R. Chamy. 2009. Treatment of low strength sewage with high suspended organic matter content in an anaerobic sequencing batch reactor and modeling application. *Electronic Journal of Biotechnology* 12(3):1-10.
- Entaban Biocombustibles del Guadalquivir SA. Recuperado de: [http://www.biodieselspain.com/plantas\\_detalle.php?id=21](http://www.biodieselspain.com/plantas_detalle.php?id=21)
- Empresa Metropolitana de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla, S.A. (2016). EDAR Copero. Recuperado de: <http://www.emasesa.com>.
- Esteban Gutiérrez, M. (2014). Co-digestión anaerobia de lodo de EDAR con residuos orgánicos de diferente naturaleza combinación de técnicas experimentales y herramientas matemáticas.
- Fernandez-Polanco, F., Nieto, P., Pérez-Elvira, S., van der Zee, F.P., Fernandez-Polanco, M., Garcia, P.A. (2005). Automated equipment for anaerobic sludge parameters determination. *Water Science and Technology* 52(1-2), 479-485.
- Ferry, J.G. (1992). "Biochemistry of Methanogenesis". *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, 27(6), 473-503.

- Field, J., Sierra-Alvarez, R., Lettinga, G. (1988). Ensayos anaerobios. In: Proceedings of the 4th Symposium on Wastewater Anaerobic Treatment, Valladolid, Spain, pp. 52–81.
- Fehrenbach, H., Giegrich, J., Reinhardt, G., Sayer, U., Gretz, M., Lanje, K., Schmitz, J. (2008). Kriterien einer nachhaltigen Bioenergienutzung im globalen Maßstab. UBA-Forschungsbericht 206, 41–112.
- García, J.L., Patel, B.K.C. y Ollivier, B. (2000). “Taxonomic, phylogenetic, and ecological diversity of methanogenic Archaea”. *Anaerobe*, 6, 205-226.
- García Rodríguez, A. 1990. Eliminación y aprovechamiento agrícola del alpechín. Reunión Internacional sobre Tratamiento de Alpechines, Córdoba.
- García-Ortiz Rodríguez, A y FRÍAS RUIZ, L. 1994. El alpechín y los orujos: sus posibles usos. *Agricultura* 746, 815-819.
- Guyot, J.P. (1990). “Etude de quelques interactions microbiennes lors de la digestion anaérobie de la matière organique par des cultures mixtes définies ou naturelles” Tesis Doctoral, Universidad de Provence, Marseille.
- Guyot, J.P. (1992). “Introducción a la microbiología de los reactores anaerobios”. *Bioprocesos anaerobios para el tratamiento de efluentes industriales*, Iztapalapa (Méjico), 1-17.
- Hartmann H, Angelidaki I, Ahring BK (2000) Increase of anaerobic degradation of particulate organic matter in full-scale biogas plants by mechanical maceration. *Water Sci Technol* 41 (3):145-153.
- ISO 11734, 1995. Water quality – Evaluation of the “ultimate” anaerobic biodegradability of organic compounds in digester sludge – Method by measurement of the biogas production. International Organization of Standardization, Switzerland.
- Jacobi, H.F., Moschner, C.R., Hartung, E. (2011). Use of near infrared spectroscopy in online-monitoring of feeding substrate quality in anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 102, 4688–4696.

- Jantsch, T.G., Mattiasson, B. (2004). An automated spectrophotometric system for monitoring buffer capacity in anaerobic digestion processes. *Water Research* 38(17), 3645-3650.
- Kim, M., Ahn, Y., Speece, R.E. (2002). Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion: mesophilic vs. thermophilic. *Water Research* 36, 4369–4385.
- Lebrato, J. (1990). Obtención de biogás a partir de residuos orgánicos urbanos: Experiencias en lecho fluidizado. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. Sevilla.
- Lundin, L., Olofsson, M., Pettersson, G., Zetterlund, H., 2004. Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options. *Resour. Conserv. Recy.* 41, 255–278.
- Mancomunidad de la Vega. (2016) Recuperado de: <http://web.lavegamancomunidad.es/>.
- Mata-Alvarez J., Mace S., Llabres P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid waste. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology* 74(1), 3-16.
- Mata-Álvarez, J., Dosta, J., Macé, S., Astals, S. (2011). Co-digestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling. *Critical Reviews in Biotechnology* 31(2), 99-111.
- McCarty, P.L. (1981). “One hundred years of anaerobic treatment”. 2nd International Symposium on Anaerobic Digestion, Travemünde, Germany, 3-22.
- McInerney, M.J., Bryan, M.P. y Stafford, D.A. (1979). “Metabolic stages and energetics of microbial anaerobic digestion”. *Anaerobic Digestion*, Stafford W.y.H., ed., Applied Science, 91-98.
- Moletta, R. (1993). La digestion anaérobic: du plus petit au plus grand. *Biofutur* 1, 16-25.
- Mösche, M. y Jördening, H. (1999). “Comparison of different models of substrate and product inhibition in anaerobic digestion”. *Water Research*, 33(11), 2545-2554.
- Morgan, J.W., Evison, L.M. y Forster, C.F. (1991). “Changes to the microbial ecology in anaerobic digesters treating ice cream wastewater during start-up”. *Water Research*, 25(6), 639-653.

- Mukhopadhyay, R., S. Chatterjee, B.P. Chatterjee, P. Banerjee and A. Guha. 2005. Production of gluconic acid from whey by free and immobilized *Aspergillus niger*. *International Dairy Journal* 15(3): 299-303.
- Neves, L., Gonçalo, E., Oliveira, R., Alves, M.M. (2008). Influence of composition on the biomethanation potential of restaurant waste at mesophilic temperatures. *Waste Management* 28(6), 965-972.
- Noike, T., Endo, G., Chang, J.-E., Yuguchi, J.-I. y Matsumoto, J.-I. (1985). "Characteristics of carbohydrate degradation and the rate-limiting step in anaerobic digestion". *Biotechnology and Bioengineering*, 27, 1482-1489.
- Ocaña Perez-Cerdá, Fco. J. 2011. "Biodigestor Anaerobio de Laboratorio" Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Universidad de Madrid.
- Pagga, U., Beimborn, D.B. (1993). Anaerobic biodegradation test for organic compounds. *Chemosphere* 27(8), 1499–1509.
- Pastor, J. (2002). Vertederos controlados. Problemática de los Lixiviados (p. 50-65).CSIC.
- Parra, A. (2009). Lactosuero: importancia en la industria de alimentos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*.62 (1): 4967-4982.
- Pereira, M.A., Pires, O.C., Mota, M., Alves, M.M. (2005). Anaerobic biodegradation of oleic and palmitic acids: Evindence of mass transfer limitation caused by long chain fatty acid accumulation onto anaerobic sludge. *Biotechnology and Bioengineering* 92(1), 15-23.
- Pereira, M.A., Sousa, D.Z., Mota, M., Alves, M.M. (2010). Lipids and LCFA inhibition: key parameter in anaerobic digestion process. *International Workshop on Anaerobic Digestion of Slaughterhouse Waste in ECOFARM- Innovation for Sustainable Livestock*. Barcelona (Spain). July 8th – July 10th.
- Pind, P.F., Angelidaki, I., Ahring, B.K. (2003a). A new VFA sensor technique for anaerobic reactor systems. *Biotechnology and Bioengineering* 82(1), 54-61.
- Pind, P.F., Angelidaki, I., Ahring, B.K. (2003b). Dynamics of the anaerobic process: Effects of volatile fatty acids. *Biotechnology and Bioengineering* 82(7), 791-801.



- Robra, S., Serpa da Cruz, R., de Oliveira, A.M., Neto, J.A.A., Santos, J.V. (2010). Generation of biogas using crude glycerin from biodiesel production as a supplement to cattle slurry. *Biomass and Bioenergy* 34(9), 1330-1335.
- Ruiz Cabrera, C. (2002). Aplicación de digestores anaerobios discontinuos en el tratamiento de aguas residuales industriales. Tesis doctoral Universidad de Sevilla.
- Shelton, D., Tiedje, J. (1984). General method for determining anaerobic biodegradation potential. *Applied Environmental Microbiology* 47(4), 850–857.
- Soto, M., Mendez, R., Lema, J.M. (1993). Methanogenic and non-methanogenic activity tests. Theoretical basis and experimental set up. *Water Research* 27(8), 1361-1376.
- Soubes, M. (1994). “Microbiología de la digestión anaerobia”. III Taller y Seminario Latinoamericano “Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales”, Montevideo-Uruguay, 15-28.
- Speece, R.E., Boonyakitsombut, S., Kim, M., Azbar, N., Ursillo, P. (2006). Overview of Anaerobic Treatment: Thermophilic and Propionate Implications. *Water Environment Research* 78, 460-473.
- Steyer, J.P., Bouvier, J.C., Conte, T., Gras, P., Harmand, J., Delgenes, J.P. (2002). On-line measurements of COD, TOC, VFA, total and partial alkalinity in anaerobic digestion processes using infra-red spectrometry. *Water Science and Technology* 45(10), 133–138.
- Stroot, P.G., McMahon, K.D., Mackie, R.I., Raskin, L. (2001). Anaerobic co-digestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions-I. Digester performance. *Water Research* 35(7), 1804-1816.
- Stronach, S.M., Rudd, T. y Lester, J.N. (1986). *Anaerobic Digestion Processes in Industrial Wastewater Treatment*, Springer-Verlog, Berlin.
- Terreros-Mecalco, J., Olmos, A. et al; (2009). Digestión anaerobia en dos etapas de lodos primarios y secundarios con reactores anaerobios de flujo ascendente. Tesis doctoral, Universidad Autónoma Metropolitana
- Toerien, D.F. y Hattingh, W.H.J. (1969). “The microbiology of anaerobic digestion”. *Water Research*, 3, 385-389.

- Umetsu, K., Yamazaki, S., Kishimoto, T., Takasashi, J., Shibata, Y., Zhang, C., Misaki, T., Hamamoto, O., Ihara, I., Komiyama, M. (2006). Anaerobic co-digestion of dairy manure and sugar beets. *International Congress Series* 1293 (2006) 307-310.
- Vavilin, V.A., Vasiliev, V.B., Rytov, S.V., Ponomarev, A.V. (1995). Modeling ammonia and hydrogen sulfide inhibition in anaerobic digestion. *Water Research* 29(3), 827-835.
- Vavilin, V.A., Angelidaki, I. (2005). Anaerobic degradation of solid material: Importance of initiation centers for methanogenesis, mixing intensity, and 2D distributed model. *Biotechnology and Bioengineering* 89(1), 113-122.
- Vega Piqueres, J.M.; Castillo, F.; Cárdenas, J.; 1983. *Guiones de Bioquímica*. Universidad de Sevilla Ed.
- W. Charles, L. Walker, R. Cord-Ruwisch (2009). Effect of pre-aeration and inoculum on the start-up of batch thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste *Bioresour Technol.*, 100, pp. 2329–2335
- Widdel, F. (1988). “Microbiology and ecology of sulfate- and sulfurreducing bacteria”. *Biology of anaerobic microorganisms*, Zehnder A.J.B., ed., 469.
- Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiological Biotechnology* 85, 849-860.
- Zeikus, J.G. (1979). “Microbial populations in digesters”. *Anaerobic digestion*, Stafford, Whetley y Hughes, eds., Applied Science, 61-89.
- Zeikus, J.G. (1981). “Microbial intermediary metabolism in anaerobic digestion”. 2nd *International Symposium on Anaerobic Digestion*, Travemünde, Germany, 23-36.

## **Anexo I**

---

### **Digestión anaerobia mono-sustrato**



## Anexo I. Digestión anaerobia mono-sustrato

Los resultados de las analíticas de laboratorio llevadas a cabo con el fin de determinar las características de los residuos, así como el inóculo utilizado en cada fase del ensayo. Con respecto a las analíticas, se ha seguido la metodología descrita en el capítulo 4.

### 1. Residuos orgánicos

En la tabla 111, se muestran los resultados de las analíticas de laboratorio. Como se recoge en dicha tabla, los residuos utilizados poseen unas características significativamente diferentes, puesto que existe cierta variabilidad entre los resultados analíticos obtenidos para cada uno de ellos. A continuación, se detallan las diferencias más destacables.

En cuanto a los datos del contenido de **sólidos**, el aceite usado de cocina es el que posee una mayor proporción, en el caso de sólidos totales  $851.065,54 \pm 0,83 \text{ mgL}^{-1}$ . La glicerina y la cascara de arroz tienen una cantidad de sólidos totales, superior a  $300.000 \text{ mgL}^{-1}$ , siendo mayor en la cascara de arroz  $346.000,85 \pm 0,80 \text{ mgL}^{-1}$ . En el caso del alperujo, tanto los ST y SV, presenta un  $264.000,77 \pm 0,80 \text{ mgL}^{-1}$  y  $235.000,45 \pm 0,81 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente. Los dos tipos de suero, presentan diferente cantidad de materia sólida y volátil siendo superior en el suero ácido. El fango mixto presenta mayor cantidad de ST y SV que el alpechín, siendo en este último de  $16.645,18 \pm 0,84 \text{ mg L}^{-1}$  y  $9.210,74 \pm 0,88 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente. El residuo que presenta menor cantidad de sólidos es el lixiviados, los sólidos totales como volátiles, presentan unos datos de  $13.300,22 \pm 0,81 \text{ mgL}^{-1}$  y  $4.350,02 \pm 0,84 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente.

En términos de **materia orgánica**, es importante mencionar que al aceite le corresponde un valor muy elevado, próximo a los  $200.000 \text{ mgL}^{-1}$ . El Alperujo presenta  $264.000 \text{ mgL}^{-1}$ , un dato bastante elevado. La cascara de arroz presenta una DQO alrededor de los  $125.000 \text{ mgL}^{-1}$ , por debajo está la glicerina con  $108.000 \text{ mgL}^{-1}$ . El fango mixto y el Alpechín presentan una DQO similar, en torno a  $35.000 \text{ mgL}^{-1}$ . El valor más bajo le corresponde al lixiviado con  $23.145 \pm 0,75 \text{ mgL}^{-1}$ . Por otro lado, se puede observar que existe variabilidad entre los diferentes residuos en términos de pH; siendo el residuo más ácido el de suero ácido (4,08) y el más neutro, el aceite (6,74).

Tabla 111. Caracterización Residuos. Digestión anaerobia mono-sustrato

Parámetros	Unidades	Fango Mixto	Cascara Arroz	Suero Bruto	Suero Ácido
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	33.310,02 ±0,75	123.456,21 ±0,70	56.452,77 ±0,72	62.468,74 ±0,75
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	26.410,44 ±0,81	346.000,85 ±0,80	30.350,63 ±0,82	46.190,36 ±0,83
<b>Materia Seca</b>	%	2,64	34,60	3,04	4,62
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	19.213,11 ±0,84	244.000,50 ±0,86	27.040,52 ±0,80	34.365,00 ±0,82
<b>Materia Volátil</b>	%	72,75	70,52	89,09	74,40
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	7.197,23 ±0,95	102.000,33 ±0,85	3.310,65 ±0,91	11.825,70 ±0,94
<b>pH</b>		6,32 ±0,01	-	4,96 ±0,01	4,082 ±0,01
<b>Conductividad</b>	mS cm <sup>-1</sup>	8,90 ±0,02	-	4,91 ±0,02	7,65 ±0,02

Parámetros	Unidades	Alperujo	Glicerina	Lixiviado	Alpechín	Aceite
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	164.000,89 ±0,72	108.832,32 ±0,71	23.145,41 ±0,75	31.979,32 ±0,71	198.912,02 ±0,70
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	264.000,77 ±0,80	312.000,55 ±0,85	13.300,22 ±0,81	16.645,18 ±0,84	851.065,54 ±0,83
<b>Materia Seca</b>	%	26,40	31,20	1,33	1,66	85,11
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	235.000,45 ±0,81	273.410,45 ±0,82	4.350,02 ±0,84	9.210,74 ±0,88	848.905,17 ±0,83
<b>Materia Volátil</b>	%	89,02	87,63	32,71	55,33	99,75
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	29.000,63 ±0,87	38.590,73 ±0,86	8.950,17 ±0,89	7.435,11 ±0,80	2.160,63 ±0,83
<b>pH</b>		6,53 ±0,01	4,24 ±0,01	4,35 ±0,01	6,25 ±0,01	6,74 ±0,01
<b>Conductividad</b>	mS cm <sup>-1</sup>	-	14,23 ±0,02	18,75 ±0,02	9,78 ±0,02	0,11 ±0,02

## 2. Inóculo

En este apartado, se han reunido los resultados correspondientes a las medidas analíticas realizadas al inóculo que utilizaremos en las fases del ensayo.

En la **fase 1**, para realizar el ensayo BMP, se ha utilizado como fuente de biomasa metanogénica activa fango digerido extraído de los digestores de la EDAR. Su composición se muestra en la tabla 112.

Tabla 112. Inóculo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1

Inóculo		
Parámetros	Unidades	
DQO	mg L <sup>-1</sup>	15.840,25 ±0,68
ST	mg L <sup>-1</sup>	17.890,65 ±0,84
Materia Seca	%	1,79
SV	mg L <sup>-1</sup>	11.135,45 ±0,98
Materia Volátil	%	62,24
SF	mg L <sup>-1</sup>	6.755,46 ±0,97
pH		7,00 ±0,01
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	11,44 ±0,02
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	6.000,21 ±1,02
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	409,22 ±1,01
Relación AGV/Alcalinidad		0,07

En la **fase 2**, se ha utilizado como fuente de biomasa metanogénica activa, fango adaptado extraído de los BMP de la fase 1 de este ensayo, como se ha desarrollado en el apartado material y métodos 4. Su composición se muestra en la tabla 113, en la cual se puede observar que todos los fangos adaptados presentan diferente cantidad de materia orgánica y sólidos, debido al porcentaje de eliminación que se dio en la primera fase. En el caso de la glicerina, es el fango adaptado que mayor DQO presenta (18.616,44 ±0,75 mg L<sup>-1</sup>). En cambio, el alpechín es el que menos, 14.052,74 ±0,74 mg L<sup>-1</sup>.

Tabla 113. Inóculo Adaptado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2

Parámetros	Unidades	Fango mixto	Cascara arroz	Suero bruto	Suero ácido
DQO	mg L <sup>-1</sup>	18.255,01 ±0,71	18.040,05 ±0,75	18.650,11 ±0,77	15.450,24 ±0,78
ST	mg L <sup>-1</sup>	21.490,74 ±0,90	20.575,45 ±0,88	21.955,21 ±0,84	20.910,54 ±0,83
Materia Seca	%	2,15	2,06	2,20	2,09
SV	mg L <sup>-1</sup>	12.755,78 ±0,88	12.500,65 ±0,85	12.170,98 ±0,86	11.140,45 ±0,90
Materia Volátil	%	59,35	60,75	55,43	53,28
SF	mg L <sup>-1</sup>	8.735,44 ±0,89	8.075,85 ±0,91	9.785,63 ±0,92	9.770,74 ±0,88
pH		7,00 ±0,01	7,00 ±0,01	7,00 ±0,01	7,00 ±0,01

Parámetros	Unidades	Alperujo	Glicerina	Lixiviado	Alpechín	Aceite
DQO	mg L <sup>-1</sup>	14.692,21 ±0,77	18.616,44 ±0,75	16.775,54 ±0,72	14.052,74 ±0,74	15.893,65 ±0,71
ST	mg L <sup>-1</sup>	20.460,74 ±0,83	22.510,87 ±0,85	22.445,74 ±0,84	20.370,65 ±0,88	19.065,77 ±0,90
Materia Seca	%	2,05	2,25	2,24	2,04	1,91
SV	mg L <sup>-1</sup>	11.070,55 ±0,90	11.645,65 ±0,85	12.205,12 ±0,86	12.700,18 ±0,85	11.810,63 ±0,80
Materia Volátil	%	54,11	51,73	54,38	62,35	61,95
SF	mg L <sup>-1</sup>	9.390,52 ±0,87	10.865,77 ±0,92	10.240,65 ±0,90	7.670,63 ±0,91	7.255,14 ±0,91
pH		7,00 ±0,01	7,00 ±0,01	7,00 ±0,01	7,00 ±0,01	7,00 ±0,01



En la **fase 3**, se ha utilizado como fuente de biomasa metanogénica activa el fango adaptado extraído de los BMP de la fase 2 de este ensayo, tal y como se ha desarrollado en el apartado material y métodos 114. Su composición se muestra en la tabla 114, en la cual se puede observar que todos los fangos adaptados presentan diferente cantidad de materia orgánica y sólidos, debido al porcentaje de eliminación que se dio en la primera fase. En el caso de la glicerina y la cascara de arroz, son los fangos adaptados que mayor DQO presentan,  $19.040,06 \pm 0,75 \text{ mg L}^{-1}$  y  $19.616,2 \pm 0,70 \text{ mg L}^{-1}$ , respectivamente. En cambio, el alpechín es el que menos,  $14.052,32 \pm 0,75 \text{ mg L}^{-1}$ .

Tabla 114. Inóculo Adaptado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3

Parámetros	Unidades	Fango Mixto	Cascara Arroz	Suero Bruto	Suero Ácido
DQO	mg L <sup>-1</sup>	18.255,50 ±0,77	19.040,06 ±0,75	18.650,84 ±0,74	15.450,54 ±0,78
ST	mg L <sup>-1</sup>	22.160,45 ±0,80	22.560,63 ±0,82	24.520,42 ±0,85	22.015,12 ±0,88
Materia Seca	%	2,22	2,26	2,45	2,20
SV	mg L <sup>-1</sup>	12.210,13 ±0,90	13.645,47 ±0,85	12.034,95 ±0,86	11.085,21 ±0,84
Materia Volátil	%	55,10	60,48	49,08	50,35
SF	mg L <sup>-1</sup>	9.950,23 ±0,78	8.915,71 ±0,87	12.486,08 ±0,85	10.930,10 ±0,86
pH		7,00 ±0,01	7,00 ±0,01	7,00 ±0,01	7,00 ±0,01

Parámetros	Unidades	Alperujo	Glicerina	Lixiviado	Alpechín	Aceite
DQO	mg L <sup>-1</sup>	14.600,54 ±0,78	19.616,2 ±0,70	16.780,78 ±0,77	14.052,32 ±0,75	15.893,45 ±0,75
ST	mg L <sup>-1</sup>	22.035,56 ±0,85	21.280,56 ±0,81	23.215,66 ±0,86	21.275,42 ±0,90	22.500,36 ±0,82
Materia Seca	%	2,20	2,13	2,32	2,13	2,25
SV	mg L <sup>-1</sup>	11.022,46 ±0,83	10.050,45 ±0,86	11.210,64 ±0,85	11.685,25 ±0,80	12.450,64 ±0,88
Materia Volátil	%	50,02	47,23	48,29	54,92	55,33
SF	mg L <sup>-1</sup>	11.013,23 ±0,89	11.230,62 ±0,83	12.005,23 ±0,87	9.590,26 ±0,86	10.050,25 ±0,83
pH		7,00 ±0,01	7,00 ±0,01	7,00 ±0,01	7,00 ±0,01	7,00 ±0,01

## **Anexo II**

---

### **Co-digestión anaerobia de Fango mixto y residuos orgánicos**



## Anexo II. Co-digestión anaerobia de Fango mixto y residuos orgánicos

En este apartado, se han reunido los resultados correspondientes a las medidas analíticas realizadas con los diferentes residuos, así como el inóculo utilizado en cada fase del ensayo. Con respecto a las analíticas, se ha seguido la metodología descrita en el capítulo 4.

### 1. Fango mixto y Residuos Orgánicos

En cada fase se ha utilizado un fango mixto nuevo, por lo que la composición y la caracterización de la mezclas de fango mixto y residuos orgánicos varía en cada fase del ensayo. A continuación, se muestran los resultados de las analíticas de laboratorio llevadas a cabo con el fin de determinar las características de los residuos empleados en este trabajo.

En la **fase 1**, tal y como se recoge de los datos recopilados en las tabla 115-116, los residuos utilizados poseen unas características significativamente diferentes puesto que existe cierta variabilidad entre los resultados analíticos obtenidos para cada uno de ellos. A continuación, se detallan las diferencias más destacables.

En cuanto a los datos del contenido de **sólidos**, la mezcla de fango mixto y aceite usado de cocina es el que posee una mayor proporción, en el caso de sólidos totales  $257.345,53 \pm 0,81 \text{ mgL}^{-1}$ . La mezcla de fango mixto con alperujo tiene un total de  $70.385,12 \pm 0,82$  y, la mezcla fango mixto junto a la cascara de arroz tienen una cantidad de sólidos totales de  $71.360,11 \pm 0,85 \text{ mgL}^{-1}$ , siendo mayor en esta última mezcla. En el caso del de la mezcla de fango mixto y glicerina, tanto los ST y SV, presenta un  $41.495,14 \pm 0,85 \text{ mgL}^{-1}$  y  $27.685,88 \pm 0,83 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente. Los dos tipos de suero, presentan diferente cantidad de materia sólida y volátil siendo un poco superior en el suero ácido ( $29.690,65 \pm 0,90 \text{ mgL}^{-1}$ ). El fango mixto presenta mayor cantidad de ST y SV que la mezcla de este y el alpechín, siendo en este último de  $24.460,45 \pm 0,90 \text{ mg L}^{-1}$  y  $13.860,78 \pm 0,84 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente. La mezcla que presenta menor cantidad de sólidos es fango mixto junto con el lixiviados, los sólidos totales como volátiles, presentan unos datos de  $23.750,77 \pm 0,84 \text{ mgL}^{-1}$  y  $13.375,33 \pm 0,90 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente.

En términos de **materia orgánica**, es importante mencionar que la mezcla de fango mixto y aceite usado de cocina le corresponde un valor muy elevado,  $148.856,22 \pm 0,79 \text{ mgL}^{-1}$ . La mezcla de fango mixto y alperujo y, la mezcla de fango mixto y glicerina presentan una DQO muy similar siendo de  $58.975,14 \pm 0,75 \text{ mgL}^{-1}$  y  $59.356,23 \pm 0,78 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente. La mezcla de fango mixto y cascara de arroz presenta una DQO alrededor de los  $33.000 \text{ mgL}^{-1}$ , por debajo está la mezcla de fango mixto y alpechín ( $25.489,45 \pm 0,74 \text{ mgL}^{-1}$ ) y, fango mixto y lixiviado ( $25.489,45 \pm 0,74 \text{ mgL}^{-1}$ ). Por otro lado, se puede observar que existe variabilidad entre los diferentes residuos en términos de pH; siendo el residuo más ácido la mezcla de fango mixto y glicerina ( $2,47 \pm 0,01$ ) y el más neutro, la mezcla fango mixto y lixiviado ( $7,22 \pm 0,01$ ).

Tabla 115. Mezcla de Fango mixto y residuos orgánicos. Co-digestión Fase 1

Parámetros	Unidades	Fango Mixto	FM-Cascara Arroz	FM-Suero Bruto	FM-Suero Ácido
DQO	mg L <sup>-1</sup>	26.782,03 ±0,72	32.275,11 ±0,78	34.197,78 ±0,72	33.987,01 ±0,75
ST	mg L <sup>-1</sup>	27.355,02 ±0,82	71.360,11 ±0,85	26.895,33 ±0,86	29.690,65 ±0,90
Materia Seca	%	2,74	7,14	2,69	2,97
SV	mg L <sup>-1</sup>	16.360,47 ±0,88	46.890,74 ±0,89	17.885,66 ±0,90	19.495,36 ±0,84
Materia Volátil	%	59,81	65,71	66,50	65,66
SF	mg L <sup>-1</sup>	10.995,00 ±0,88	24.470,00 ±0,85	9.010,00 ±0,86	10.195,00 ±0,90
pH		5,56 ±0,01	5,80 ±0,01	5,32 ±0,01	4,92 ±0,01
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	4,34 ±0,02	4,87 ±0,02	6,70 ±0,02	7,78 ±0,02
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	3.600,00 ±1,02	2.850,00 ±1,00	2.875,14 ±1,03	3.163,27 ±1,05
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	987,00 ±1,00	2.150,00 ±1,04	2.482,27 ±0,95	2.991,38 ±0,99
Relación AGV/Alcalinidad		0,27	0,75	0,86	0,95

Tabla 116. Mezcla de Fango mixto y residuos orgánicos. Co-digestión. Fase 1

Parámetros	Unidades	FM-Alperujo	FM-Glicerina	FM-Lixiviado	FM-Alpechín	FM-Aceite
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	58.975,14 ±0,75	59.356,23 ±0,78	21.987,01 ±0,77	25.489,45 ±0,74	148.856,22 ±0,79
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	70.385,12 ±0,82	41.495,14 ±0,85	23.750,77 ±0,84	24.460,45 ±0,90	257.345,53 ±0,81
<b>Materia Seca</b>	%	7,04	4,15	2,38	2,45	25,73
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	55.330,75 ±0,86	27.685,88 ±0,83	13.375,33 ±0,90	13.860,78 ±0,84	226.865,85 ±0,88
<b>Materia Volátil</b>	%	78,61	66,72	56,32	56,66	88,16
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	15.055,54 ±0,88	13.810,69 ±0,80	10.375,77 ±0,82	10.600,22 ±0,84	30.480,45 ±0,86
<b>pH</b>		5,13 ±0,01	2,47 ±0,01	7,22 ±0,01	5,57 ±0,01	6,73 ±0,01
<b>Conductividad</b>	mS cm <sup>-1</sup>	7,72 ±0,02	12,79 ±0,02	8,80 ±0,02	4,13 ±0,02	3,36 ±0,02
<b>Alcalinidad</b>	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	4.081,77 ±1,02	4.085,21 ±1,05	4.387,36 ±1,10	2.448,89 ±1,05	2.244,90 ±1,05
<b>AGV</b>	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	2.450,24 ±0,95	1.896,15 ±1,00	931,03 ±1,02	1.551,72 ±1,05	2.586,42 ±1,03
<b>Relación AGV/Alcalinidad</b>		0,60	0,46	0,21	0,63	1,15



En la **fase 2**, tal y como se recoge de los datos recopilados en las tablas 117-118, los residuos utilizados poseen unas características significativamente diferentes puesto que existe cierta variabilidad entre los resultados analíticos obtenidos para cada uno de ellos. A continuación, se detallan las diferencias más destacables.

En cuanto a los datos del contenido de **sólidos**, la mezcla de fango mixto y aceite usado de cocina es el que posee una mayor proporción, en el caso de sólidos totales  $133.980,22 \pm 0,86 \text{ mgL}^{-1}$ . La mezcla de fango mixto con alperujo tiene un total de  $62.850,22 \pm 0,85 \text{ mgL}^{-1}$  y, la mezcla fango mixto junto a la cascara de arroz tienen una cantidad de sólidos totales de  $67.185,74 \pm 0,90 \text{ mgL}^{-1}$ , siendo mayor en esta última mezcla. En el caso de la mezcla de fango mixto y glicerina, tanto los ST y SV, presenta un  $34.170,36 \pm 0,88 \text{ mgL}^{-1}$  y  $19.725,65 \pm 0,88 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente. Los dos tipos de suero, presentan diferente cantidad de materia sólida y volátil siendo un poco superior en el suero bruto ( $26.220,85 \pm 0,85 \text{ mgL}^{-1}$ ). El fango mixto presenta menor cantidad de ST y SV que la mezcla de este y el alpechín, siendo en este último de  $30.545,96 \pm 0,84 \text{ mg L}^{-1}$  y  $17.785,84 \pm 0,80 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente. La mezcla de fango mixto junto con el lixiviado tiene composición de sólidos totales y volátiles de  $32.020,12 \pm 0,85 \text{ mgL}^{-1}$  y  $17.410,33 \pm 0,89 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente.

En términos de **materia orgánica**, es importante mencionar que la mezcla de fango mixto y aceite usado de cocina le corresponde un valor muy elevado,  $136.897,96 \pm 0,80 \text{ mgL}^{-1}$ . La mezcla de fango mixto y alperujo  $56.975,14 \pm 0,77 \text{ mgL}^{-1}$ , es superior a la mezcla de fango mixto y glicerina, siendo de  $48.356,11 \pm 0,76 \text{ mgL}^{-1}$ . La mezcla de fango mixto y cascara de arroz presenta una DQO alrededor de los  $29.000 \text{ mgL}^{-1}$ , por debajo está la mezcla de fango mixto y alpechín ( $23.479,36 \pm 0,76 \text{ mgL}^{-1}$ ) y, fango mixto y lixiviado ( $20.988,21 \pm 0,74 \text{ mgL}^{-1}$ ). Por otro lado, se puede observar que existe variabilidad entre los diferentes residuos en términos de pH; siendo el residuo más ácido la mezcla de fango mixto y glicerina ( $3,56 \pm 0,01$ ) y el más neutro, la mezcla de fango mixto y lixiviado ( $7,72 \pm 0,01$ ).

Tabla 117. Mezcla de Fango mixto y residuos orgánicos. Co-digestión, Fase 2

Parámetros	Unidades	Fango Mixto	FM-Cascara Arroz	FM-Suero Bruto	FM-Suero Ácido
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	25.782,11 ±0,78	28.975,45 ±0,77	29.250,75 ±0,79	29.569,65 ±0,80
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	26.355,14 ±0,89	67.185,74 ±0,90	26.220,85 ±0,85	25.760,36 ±0,84
<b>Materia Seca</b>	%	2,64	6,72	2,62	2,58
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	16.360,23 ±0,88	45.700,65 ±0,85	17.598,32 ±0,84	17.650,11 ±0,90
<b>Materia Volátil</b>	%	62,08	68,02	67,12	68,52
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	9.995,99 ±0,85	21.485,12 ±0,82	8.622,85 ±0,87	8.110,74 ±0,90
<b>pH</b>		5,84 ±0,01	5,87 ±0,01	5,98 ±0,01	5,25 ±0,01
<b>Conductividad</b>	mS cm <sup>-1</sup>	4,60 ±0,02	4,87 ±0,02	6,70 ±0,02	7,78 ±0,02
<b>Alcalinidad</b>	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	3.800,75 ±1,02	2.850,65 ±1,05	2.875,14 ±1,06	3.163,27 ±1,08
<b>AGV</b>	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	9.70,66 ±1,00	2.150,12 ±0,96	2.482,27 ±1,02	2.991,38 ±1,05
<b>Relación AGV/Alcalinidad</b>		0,26	0,75	0,86	0,95

Tabla 118. Mezcla de Fango mixto y residuos orgánicos. Co-digestión, Fase 2

Parámetros	Unidades	FM-Alperujo	FM-Glicerina	FM-Lixiviado	FM-Alpechín	FM-Aceite
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	56.975,14 ±0,77	48.356,11 ±0,76	20.988,21 ±0,74	23.479,36 ±0,76	136.897,96 ±0,80
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	62.850,22 ±0,85	34.170,36 ±0,88	32.020,12 ±0,85	30.545,96 ±0,84	133.980,22 ±0,86
<b>Materia Seca</b>	%	6,29	3,42	3,20	3,05	13,40
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	54.855,85 ±0,85	19.725,65 ±0,88	17.410,33 ±0,89	17.785,84 ±0,80	119.275,62 ±0,88
<b>Materia Volátil</b>	%	87,28	57,73 ±	54,37	58,23	89,02
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	7.995,20 ±0,78	14.445,33 ±0,77	14.610,36 ±0,76	12.760,30 ±0,80	14.705,52 ±0,90
<b>pH</b>		6,15 ±0,01	3,56 ±0,01	7,72 ±0,01	5,67 ±0,01	6,73 ±0,01
<b>Conductividad</b>	mS cm <sup>-1</sup>	7,71 ±0,02	11,69 ±0,02	7,79 ±0,02	3,40 ±0,02	2,80 ±0,02
<b>Alcalinidad</b>	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	4.081,11 ±1,02	4085,23 ±1,04	4387,63 ±1,03	2.448,89 ±1,00	2.244,93 ±1,02
<b>AGV</b>	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	2.450,36 ±0,99	1.896,15 ±1,02	931,03 ±1,06	1.551,72 ±1,01	2.586,22 ±0,95
<b>Relación AGV/Alcalinidad</b>		0,60	0,46	0,21	0,63	1,15

En la **fase 3**, tal y como se recoge de los datos recopilados en la tabla 119-120, los residuos utilizados poseen unas características significativamente diferentes puesto que existe cierta variabilidad entre los resultados analíticos obtenidos para cada uno de ellos. A continuación, se detallan las diferencias más destacables.

En cuanto a los datos del contenido de **sólidos**, la mezcla de fango mixto y aceite usado de cocina es el que posee una mayor proporción, en el caso de sólidos totales  $134.790,84 \pm 0,84 \text{ mgL}^{-1}$ . La mezcla de fango mixto con alperujo tiene un total de  $76.790,80 \pm 0,84 \text{ mgL}^{-1}$  y, la mezcla fango mixto junto a la cascara de arroz tienen una cantidad de sólidos totales de  $66.945,23 \pm 0,88 \text{ mgL}^{-1}$ , siendo mayor en la mezcla de fango mixto y alperujo. En el caso de la mezcla de fango mixto y glicerina, tanto los ST y SV, presenta un  $33.475,74 \pm 0,85 \text{ mgL}^{-1}$  y  $21.005,21 \pm 0,86 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente. Los dos tipos de suero, presentan diferente cantidad de materia sólida y volátil siendo un poco superior en el suero bruto ( $25.380,46 \pm 0,90 \text{ mgL}^{-1}$ ). El fango mixto presenta una cantidad de similar de ST y SV que la mezcla de este y el alpechín, siendo en este último de  $23.975,65 \pm 0,86 \text{ mg L}^{-1}$  y  $16.700,35 \pm 0,90 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente. La mezcla de fango mixto junto con el lixiviado tiene composición de sólidos totales y volátiles de  $22.480,77 \pm 0,84 \text{ mgL}^{-1}$  y  $13.620,19 \pm 0,80 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente.

En términos de **materia orgánica**, es importante mencionar que la mezcla de fango mixto y aceite usado de cocina le corresponde un valor muy elevado,  $145.200,96 \pm 0,71 \text{ mgL}^{-1}$ . La mezcla de fango mixto y alperujo  $60.450,01 \pm 0,74 \text{ mgL}^{-1}$ , es superior a la mezcla de fango mixto y glicerina, siendo de  $57.340,12 \pm 0,78 \text{ mgL}^{-1}$ . La mezcla de fango mixto y cascara de arroz presenta una DQO alrededor de los  $30.000 \text{ mgL}^{-1}$ , por debajo está la mezcla de fango mixto y alpechín ( $27.645,45 \pm 0,73 \text{ mgL}^{-1}$ ) y, fango mixto y lixiviado ( $23.789,32 \pm 0,76 \text{ mgL}^{-1}$ ). Por otro lado, se puede observar que existe variabilidad entre los diferentes residuos en términos de pH; siendo el residuo más ácido la mezcla de fango mixto y glicerina ( $3,56 \pm 0,01$ ) y el más neutro, la mezcla de fango mixto y lixiviado ( $7,73 \pm 0,01$ ).

Tabla 119. Mezcla de Fango mixto y residuos orgánicos. Co-digestión, Fase 3

Parámetros	Unidades	Fango Mixto	FM-Cascara Arroz	FM-Suero Bruto	FM-Suero Ácido
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	27.520,18 ±0,77	30.024,11 ±0,79	33.456,45 ±0,73	34.750,74 ±0,80
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	25.080,02 ±0,85	66.945,23 ±0,88	25.015,66 ±0,90	25.380,46 ±0,90
<b>Materia Seca</b>	%	2,51	6,69	2,50	2,54
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	16.520,77 ±0,88	44.870,85 ±0,80	18.275,91 ±0,88	17.620,55 ±0,74
<b>Materia Volátil</b>	%	65,87	67,03	73,06	69,42
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	8.560,72 ±0,74	22.075,64 ±0,76	6.740,33 ±0,75	7.760,61 ±0,71
<b>pH</b>		5,84 ±0,01	5,87 ±0,01	5,98 ±0,01	5,25 ±0,01
<b>Conductividad</b>	mS cm <sup>-1</sup>	4,60 ±0,02	4,87 ±0,02	6,70 ±0,02	7,78 ±0,02
<b>Alcalinidad</b>	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	3.571,43 ±1,02	2.850,15 ±1,00	2.875,14 ±1,08	3.163,27 ±1,00
<b>AGV</b>	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	1.189,66 ±0,99	2.150,26 ±1,05	2.482,27 ±1,03	2.991,38 ±0,92
<b>Relación AGV/Alcalinidad</b>		0,33	0,75	0,86	0,95

Tabla 120. Mezcla de Fango mixto y residuos orgánicos. Co-digestión, Fase 3

Parámetros	Unidades	FM-Alperujo	FM-Glicerina	FM-Lixiviado	FM-Alpechín	FM-Aceite
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	60.450,01 ±0,74	57.340,12 ±0,78	23.789,32 ±0,76	27.645,45 ±0,73	145.200,96 ±0,71
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	76.790,80 ±0,84	33.475,74 ±0,85	22.480,77 ±0,84	23.975,65 ±0,86	134.790,84 ±0,84
<b>Materia Seca</b>	%	7,68	3,35	2,25	2,40	13,48
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	64.980,17 ±0,87	21.005,21 ±0,86	13.620,19 ±0,80	16.700,35 ±0,90	115.540,65 ±0,82
<b>Materia Volátil</b>	%	84,62	62,75	60,59	69,66	85,72
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	11.810,45 ±0,80	12.470,85 ±0,75	8.860,77 ±0,74	7.275,25 ±0,74	19.250,64 ±0,76
<b>pH</b>		6,15 ±0,01	3,56 ±0,01	7,73 ±0,01	5,68 ±0,01	6,73 ±0,01
<b>Conductividad</b>	mS cm <sup>-1</sup>	7,72 ±0,02	11,69 ±0,02	7,73 ±0,02	3,41 ±0,02	2,80 ±0,02
<b>Alcalinidad</b>	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	4.081,10 ±1,03	4.085,05 ±1,05	4.387,11 ±1,00	2.448,89 ±1,05	2.244,90 ±1,06
<b>AGV</b>	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	2.450,02 ±1,00	1.896,15 ±0,92	931,03 ±1,04	1.551,72 ±0,98	2.586,00 ±1,03
<b>Relación AGV/Alcalinidad</b>		0,60	0,46	0,21	0,63	1,15

## 2. Inóculo

En este apartado, se han reunido los resultados correspondientes a las medidas analíticas realizadas al inóculo que utilizaremos en las fases del ensayo.

En la **fase 1**, para realizar el ensayo BMP, se ha utilizado como fuente de biomasa metanogénica activa fango digerido extraído de los digestores de la EDAR. Su composición se muestra en la tabla 121.

Tabla 121. Caracterización Inóculo. Ensayo Co-digestión Fase 1

Inóculo		
Parámetros	Unidades	
DQO	mg L <sup>-1</sup>	10.058,36 ±0,74
ST	mg L <sup>-1</sup>	11.800,45 ±0,82
Materia Seca	%	1,18
SV	mg L <sup>-1</sup>	8.035,46 ±0,88
Materia Volátil	%	68,09
SF	mg L <sup>-1</sup>	7,00 ±0,01
pH		11,44 ±0,02
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	3.673,47 ±1,06
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	317,48 ±1,02
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	380,69 ±1,02
Relación AGV/Alcalinidad		10.058,36 ±0,74

En la **fase 2**, se ha utilizado como fuente de biomasa metanogénica activa, fango adaptado extraído de los BMP de la fase 1 de este ensayo, como se ha desarrollado en el apartado material y métodos 4. Su composición se muestra en la tabla 122, en la cual se puede observar que todos los fangos adaptados presentan diferente cantidad de materia orgánica y sólidos, debido al porcentaje de eliminación que se dio en la primera fase. En todos los ensayos la cantidad de materia orgánica se encuentra en un rango de 14.000-15.000 mg L<sup>-1</sup>.

Tabla 122. Fango Adaptado, Co-digestión Fase 2

Parámetros	Unidades	Fango Mixto	FM-Cascara Arroz	FM-Suero Bruto	FM-Suero Ácido
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	14.230,21 ±0,78	13.980,63 ±0,74	13.540,69 ±0,77	14.650,74 ±0,80
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	17.677,33 ±0,88	16.879,56 ±0,89	16.692,66 ±0,90	17.582,74 ±0,85
<b>Materia Seca</b>	%	1,76	1,68	1,66	1,75
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	9.120,45 ±0,84	10.052,52 ±0,82	8.290,33 ±0,83	8.740,63 ±0,84
<b>Materia Volátil</b>	%	51,59	59,55	49,66	49,70
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	8.557,45 ±0,74	6.827,23 ±0,72	8.402,22 ±0,73	8.842,17 ±0,70
<b>pH</b>		7,64 ±0,01	7,81 ±0,01	7,78 ±0,01	7,69 ±0,01
<b>Conductividad</b>	mS cm <sup>-1</sup>	13,36 ±0,02	13,08 ±	13,93 ±	12,98 ±

Parámetros	Unidades	FM-Alperujo	FM-Glicerina	FM-Lixiviado	FM-Alpechín	FM-Aceite
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	14.850,11 ±0,78	14.720,23 ±0,75	14.530,44 ±0,79	14.375,56 ±0,80	14.361,63 ±0,74
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	19.585,89 ±0,85	18.870,56 ±0,89	18.275,96 ±0,83	18.772,12 ±0,82	19.270,52 ±0,85
<b>Materia Seca</b>	%	1,95	1,88	1,82	1,87	1,92
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	9.064,22 ±0,85	9.660,63 ±0,85	9187,25 ±0,86	9.475,63 ±0,84	12.490,96 ±0,82
<b>Materia Volátil</b>	%	46,28	51,19	50,27	50,47	64,81
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	10.521,63 ±0,75	9.210,55 ±0,74	9.087,53 ±0,75	9.297,96 ±0,80	6.780,85 ±0,82
<b>pH</b>		7,71 ±0,01	7,96 ±0,01	7,72 ±0,01	7,78 ±0,01	6,11 ±0,01
<b>Conductividad</b>	mS cm <sup>-1</sup>	13,31 ±0,02	13,42 ±0,02	12,48 ±0,02	12,68 ±0,02	12,01 ±0,02



En la **fase 3**, se ha utilizado como fuente de biomasa metanogénica activa el fango adaptado extraído de los BMP de la fase 2 de este ensayo, tal y como se ha desarrollado en el apartado material y métodos 4. Su composición se muestra en la tabla 123, en la cual se puede observar que todos los fangos adaptados presentan diferente cantidad de materia orgánica y sólidos, debido al porcentaje de eliminación que se dio en la primera fase. En todos los ensayos la cantidad de materia orgánica se encuentra en un rango de 14.000-15.000 mg L<sup>-1</sup>. Tal y como se observa en la tabla 123. En el caso de la mezcla de fango mixto y aceite usado de concina y la mezcla de fango mixto y alperujo, son los fangos adaptados que mayor DQO presentan, 15.100,63 ±0,79 mg L<sup>-1</sup> y 14.870,11 ±0,79mg L<sup>-1</sup>, respectivamente. En cambio, la mezcla de fango mixto y suero bruto es el que menos, 13.600,78 ±0,79mg L<sup>-1</sup>.

Tabla 123.Fango Adaptado, Co-digestión Fase 3

Parámetros	Unidades	Fango Mixto	FM-Cascara Arroz	FM-Suero Bruto	FM-Suero Ácido
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	14.500,11 ±0,78	14.020,58 ±0,75	13.600,78 ±0,79	13.700,42 ±0,80
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	16.850,25 ±0,80	16.480,63 ±0,82	15.487,32 ±0,90	15.640,59 ±0,72
<b>Materia Seca</b>	%	1,69	1,65	1,55	1,56
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	8.975,35 ±0,79	11.456,36 ±0,75	8.145,18 ±0,86	8.056,15 ±0,77
<b>Materia Volátil</b>	%	53,26	69,51	52,59	51,51
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	7.875,46 ±0,75	5.024,78 ±0,73	7.342,95 ±0,76	7.584,82 ±0,73
<b>pH</b>		7,64 ±0,01	7,81 ±0,01	7,79 ±0,01	7,69 ±0,01
<b>Conductividad</b>	mS cm <sup>-1</sup>	13,36 ±0,02	13,08 ±0,02	13,93 ±0,02	12,98 ±0,02

Parámetros	Unidades	FM-Alperujo	FM-Glicerina	FM-Lixiviado	FM-Alpechín	FM-Aceite
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	14.870,11 ±0,79	14.760,18 ±0,75	14.320,21 ±0,74	14.300,36 ±0,76	15.100,63 ±0,79
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	17.548,45 ±0,80	17.420,89 ±0,82	15.420,44 ±0,85	15.720,63 ±0,86	18.450,55 ±0,84
<b>Materia Seca</b>	%	1,75	1,74	1,54	1,57	1,85
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	10.130,44 ±0,82	10.240,18 ±0,90	9.150,89 ±0,88	10.210,12 ±0,84	14.850,65 ±0,90
<b>Materia Volátil</b>	%	57,73	58,78	59,34	64,95	80,49
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	7.418,39 ±0,76	7.180,66 ±0,78	6.270,33 ±0,76	5.510,88 ±0,73	3.600,87 ±0,75
<b>pH</b>		7,72 ±0,01	7,93 ±0,01	7,74 ±0,01	7,77 ±0,01	6,91 ±0,01
<b>Conductividad</b>	mS cm <sup>-1</sup>	13,31 ±0,02	13,42 ±0,02	12,48 ±0,02	12,68 ±0,02	12,01 ±0,02

### 3. Ensayo Co-digestión de fango digerido (Inóculo)

A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1**, como se observa en la tabla 124, la eliminación de la materia orgánica en el inóculo es del 31% debido a que éste, está compuesto por materia orgánica no biodegradable. Respecto al porcentaje de eliminación de sólidos, en ST la eliminación es

#### Inóculo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	10.058,36 ±0,74	6.979,21 ±0,76	31
ST	mg L <sup>-1</sup>	11.800,45 ±0,82	10.050,22 ±0,85	15
Materia Seca	%	1,18	1,01	
SV	mg L <sup>-1</sup>	8.035,46 ±0,88	7.230,52 ±0,89	10
Materia Volátil	%	68,09	71,94	
pH		7,00 ±0,01	7,66 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	11,44 ±0,02	13,42 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	3.673,47 ±1,06	7.046,00 ±1,02	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	317,48 ±1,02	314,31 ±0,98	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	380,69 ±1,02	377,17 ±0,98	
Relación AGV/Alcalinidad		0,09	0,04	

del 15% y en SV un 10%.

Tabla 124. Ensayo Inóculo Co-digestión. Fase 1

En la **fase 2**, como se observa en la tabla 125, la eliminación de la materia orgánica en el inóculo es del 51% debido a que éste, está compuesto por materia orgánica no biodegradable. Respecto al porcentaje de eliminación de sólidos, en ST la eliminación es del 23% y en SV un 16%.

Tabla 125. Ensayo Inóculo, Co-digestión Fase 2

### Inóculo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	12.349,06 ±0,77	6.000,08 ±0,74	51
ST	mg L <sup>-1</sup>	15.185,12 ±0,81	11.765,65 ±0,86	23
Materia Seca	%	1,52	1,18	
SV	mg L <sup>-1</sup>	7.442,16 ±0,85	6.230,36 ±0,89	16
Materia Volátil	%	49,01	52,95	
pH		7,64 ±0,01	7,66 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	8,52 ±0,02	13,42 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	4.250,41 ±1,05	6.500,00 ±1,03	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	425,25 ±1,02	250,21 ±1,04	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	509,96 ±1,02	299,15 ±1,04	
Relación AGV/Alcalinidad		0,10	0,04	

En la **fase 3**, como se observa en la tabla 126, la eliminación de la materia orgánica en el inóculo es del 47% debido a que éste, está compuesto por materia orgánica no biodegradable. Respecto al porcentaje de eliminación de sólidos, en ST la eliminación es del 19% y en SV un 17%.

Tabla 126. Ensayo Inóculo, Co-digestión Fase 3

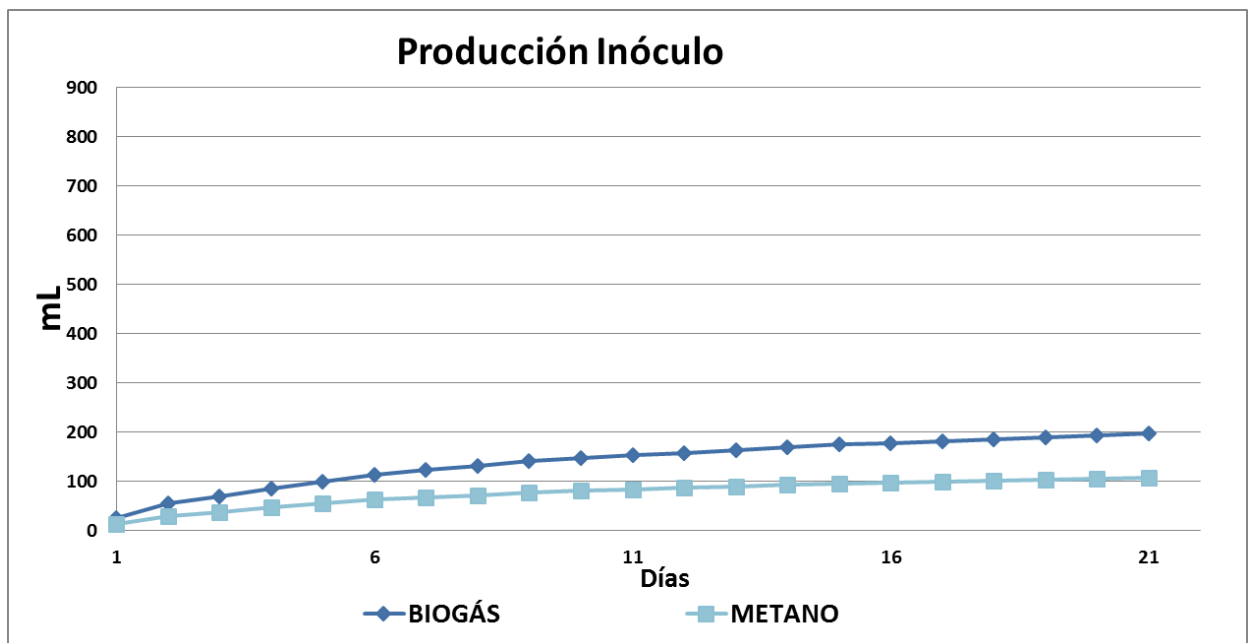
### Inóculo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	12.240,22 ±0,70	6.500,36 ±0,74	47
ST	mg L <sup>-1</sup>	14.200,11 ±0,85	11.456,85 ±0,90	19
Materia Seca	%	1,42	1,15	
SV	mg L <sup>-1</sup>	9.050,25 ±0,81	7.500,02 ±0,84	17
Materia Volátil	%	63,73	65,47	
pH		7,64 ±0,01	7,66 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	8,52 ±0,02	13,42 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	4.693,22 ±1,03	6.746,25 ±1,06	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	468,97 ±0,95	296,63 ±1,02	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	562,76 ±0,95	355,11 ±1,02	
Relación AGV/Alcalinidad		0,10	0,04	

### 3.1. Producción de Biogás

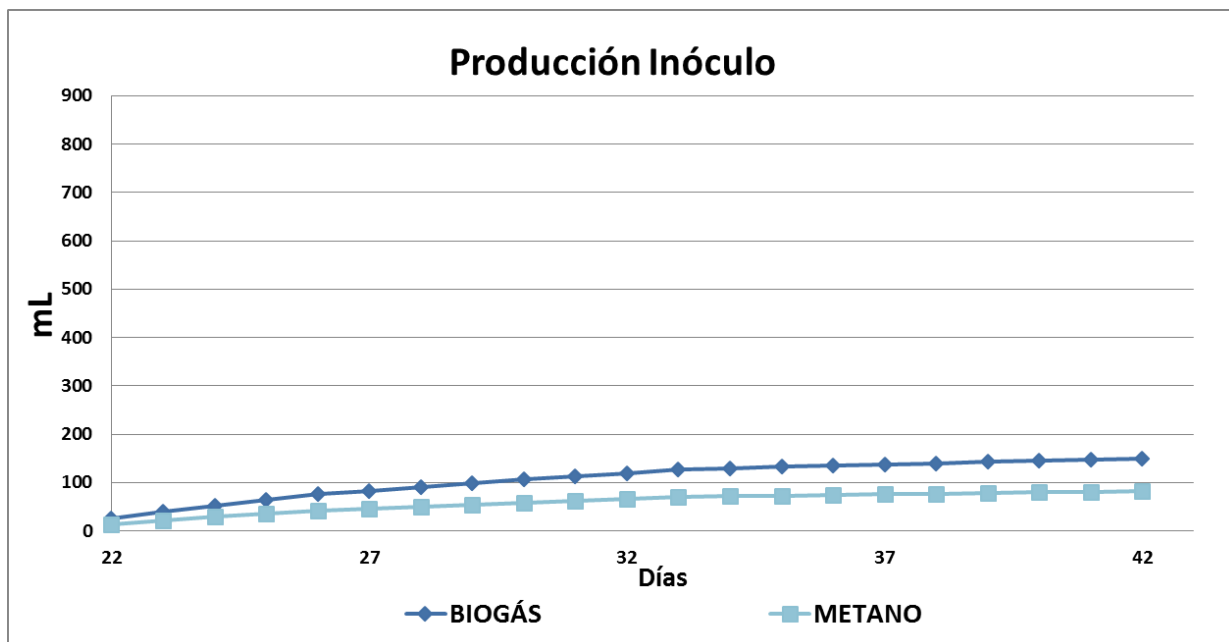
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales.

Como se puede observar en la gráficas 203, en la **fase 1**, la producción de biogás es de 197 mL, el crecimiento en la producción de biogás es lento, estabilizándose a partir del día 15. En el caso del metano, tiene un porcentaje de 55%.



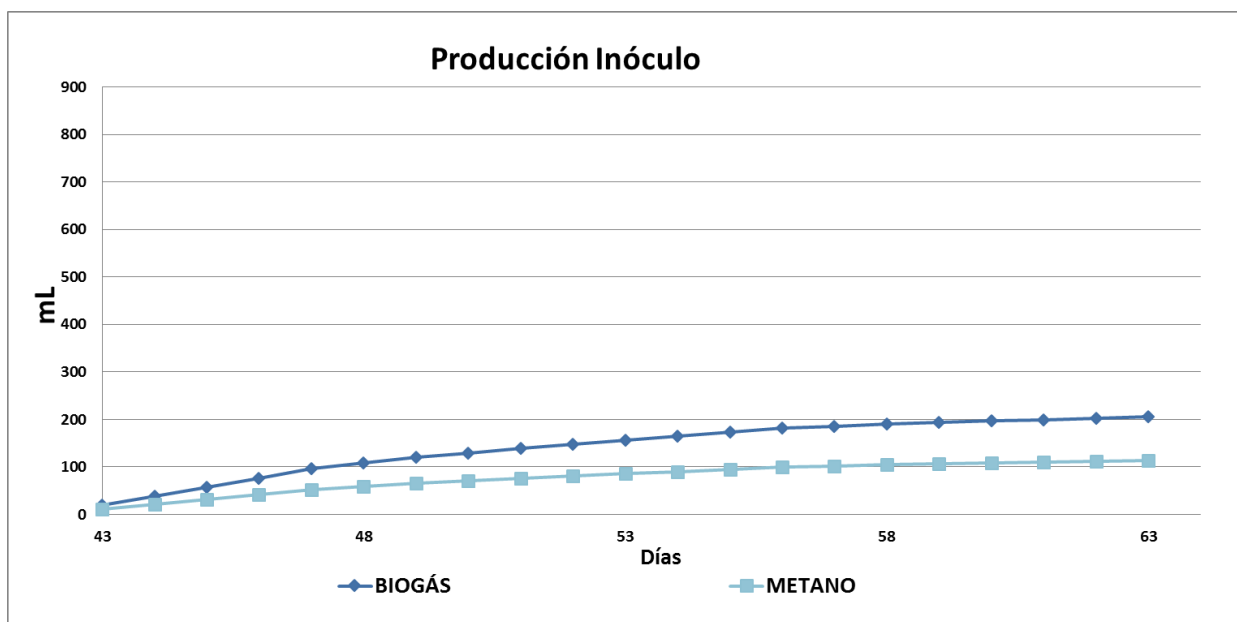
Gráfica 203. Producción Inoculo. Fase 1 Co-digestión

En la **fase 2**. Tal y como se puede observar en la gráficas 204, la producción de biogás es de 149 mL, el crecimiento en la producción de biogás es lento, estabilizándose a partir del día 32.



Gráfica 204.Producción Inóculo, Co-digestión Fase 2

Como se puede observar en la gráficas 205, la producción de biogás de la **fase 3** es de 206 mL, el crecimiento en la producción de biogás es lento, estabilizándose a partir del día 58.

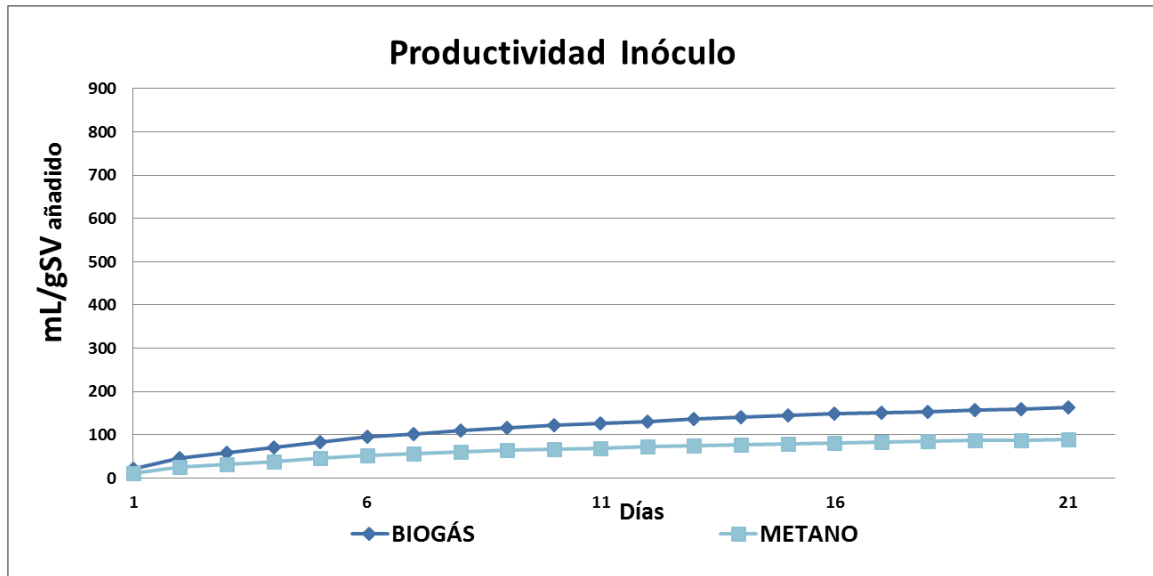


Gráfica 205.Producción Inóculo, Co-digestión Fase 3

### 3.2. Productividad de Metano

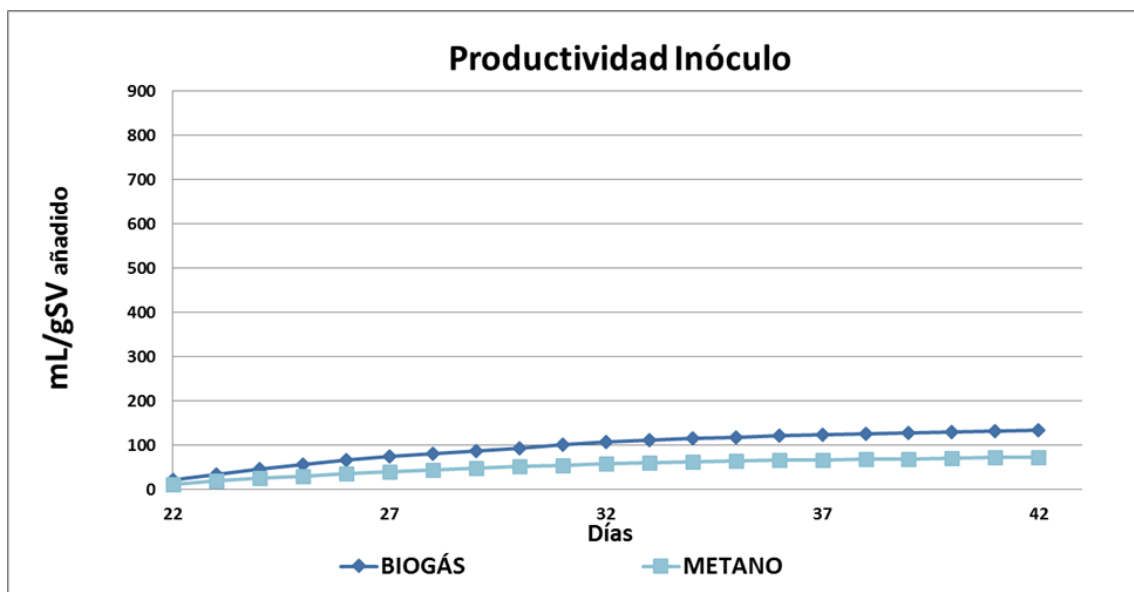
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano de las distintas fases temporales del inóculo.

En cuanto a la productividad de metano ( $\text{mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ ), en la **fase 1**, la productividad de metano del inóculo es de  $90 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ , como se observa en la gráfica 206.



Gráfica 206. Productividad Inóculo. Fase 1 Co-digestión

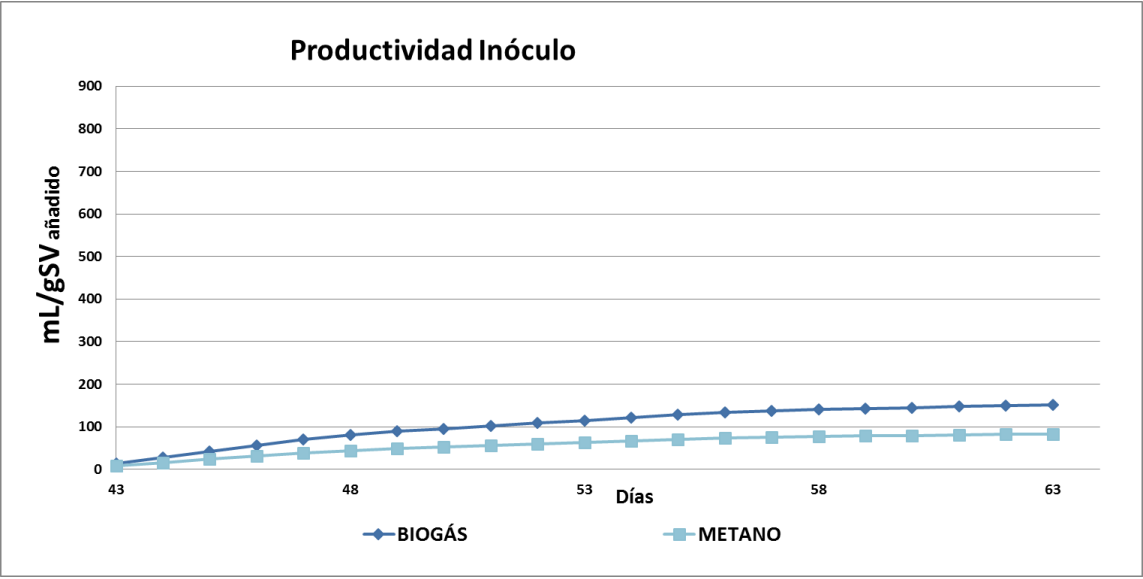
En la **fase 2** (gráfica 207), el porcentaje de metano presente en el biogás, es del 55%. La productividad de metano es de  $74 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ .



Gráfica 207. Productividad Inóculo, Co-digestión Fase 2



En la **fase 3** (gráfica 208) La productividad de metano es de 83 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, presenta un porcentaje de metano en el biogás del 55%.



Gráfica 208.Productividad Inóculo, Co-digestión Fase 3

#### 4. Ensayo Co-digestión de Fango Mixto (EDAR Copero)

A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

Como se observa en la tabla 127, en la **fase 1** la eliminación de materia orgánica en el lodo de depuradora, presenta una DQO de entrada de  $21.580,41 \pm 0,78 \text{ mg L}^{-1}$  y a la salida una DQO de  $10.519,32 \pm 0,74 \text{ mg L}^{-1}$ . Por lo tanto, presenta una eliminación del 51%. Por otro lado la eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es del 26% y 23% respectivamente. La conductividad aumenta de un  $6,56 \pm 0,02 \text{ mS cm}^{-1}$  a  $13,36 \pm 0,02 \text{ mS cm}^{-1}$  en los 21 días de ensayo.

Tabla 127. Ensayo Fango Mixto Co-digestión. Fase 1

##### Fango Mixto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$21.580,41 \pm 0,78$	$10.519,32 \pm 0,74$	51
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$17.470,23 \pm 0,85$	$12.980,26 \pm 0,90$	26
Materia Seca	%	1,75	1,30	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$13.560,53 \pm 0,83$	$10.500,43 \pm 0,86$	23
Materia Volátil	%	77,62	80,89	
pH		$7,90 \pm 0,01$	$7,64 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$6,56 \pm 0,02$	$13,36 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.469,39 \pm 1,08$	$7.922,00 \pm 1,05$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$344,83 \pm 0,96$	$288,10 \pm 1,01$	
Relación AGV/Alcalinidad	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	0,10	0,04	

En la **fase 2** como se observa en la tabla 128, la eliminación de materia orgánica en el lodo de depuradora, presenta una DQO de entrada de  $21.264,12 \pm 0,79 \text{ mgL}^{-1}$  y a la salida una DQO de  $9.648,14 \pm 0,76 \text{ mgL}^{-1}$ . Por lo tanto, presenta una eliminación del 55%. Por otro lado la eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es del 39% y 26% respectivamente. La conductividad aumenta de un  $6,68 \pm 0,02 \text{ mS cm}^{-1}$  a  $13,36 \pm 0,02 \text{ mS cm}^{-1}$  durante el tiempo del ensayo.

Tabla 128. Ensayo Fango Mixto, Co-digestión Fase 2

### Fango Mixto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$21.264,12 \pm 0,79$	$9.648,14 \pm 0,76$	55
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$20.875,65 \pm 0,81$	$12.756,12 \pm 0,86$	39
Materia Seca	%	2,09	1,28	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$10.840,41 \pm 0,86$	$8.067,74 \pm 0,90$	26
Materia Volátil	%	51,93	63,24	
pH		$7,41 \pm 0,01$	$7,64 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$6,68 \pm 0,02$	$13,36 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.010,65 \pm 1,10$	$6.410,62 \pm 1,08$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$510,51 \pm 1,03$	$250,33 \pm 0,99$	
Relación AGV/Alcalinidad	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	0,13	0,04	

Como se observa en la tabla 129 de la **fase 3**, la eliminación de materia orgánica en el lodo de depuradora, presenta una DQO de entrada de  $22.100,35 \pm 0,78 \text{ mgL}^{-1}$  y a la salida una DQO de  $11.210,12 \pm 0,80 \text{ mgL}^{-1}$ . Por lo tanto, presenta una eliminación del 49%. Por otro lado la eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es del 35% y 33% respectivamente. La conductividad aumenta de un  $6,68 \pm 0,02 \text{ mS cm}^{-1}$  a un  $13,36 \pm 0,02 \text{ mS cm}^{-1}$  en los días de ensayo.

Tabla 129. Ensayo Fango Mixto Co-digestión. Fase 3

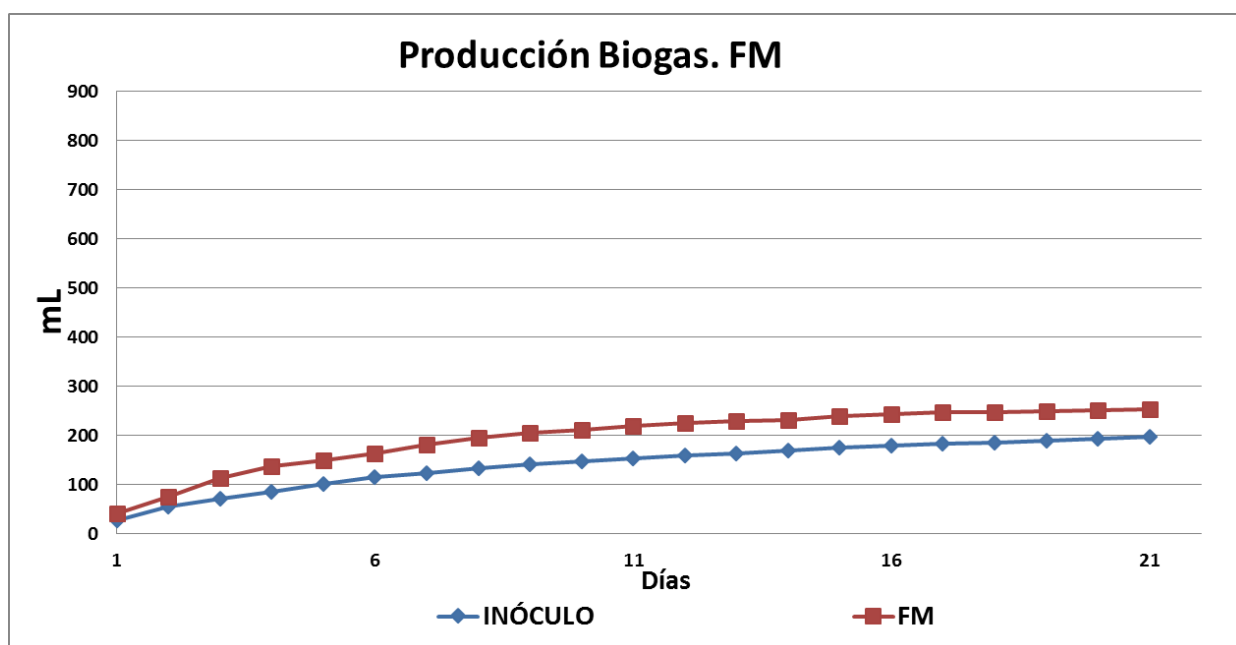
### Fango Mixto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$22.100,35 \pm 0,78$	$11.210,12 \pm 0,80$	49
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$19.750,22 \pm 0,80$	$12.840,82 \pm 0,82$	35
Materia Seca	%	1,98	1,28	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$11.420,12 \pm 0,88$	$7.650,30 \pm 0,90$	33
Materia Volátil	%	57,82	59,58	
pH		$7,41 \pm 0,01$	$7,64 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$6,68 \pm 0,02$	$13,36 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$4.285,71 \pm 1,03$	$7.800,03 \pm 1,07$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$694,33 \pm 1,05$	$344,22 \pm 1,00$	
Relación AGV/Alcalinidad	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	0,16	0,04	

#### 4.1. Producción de Biogás

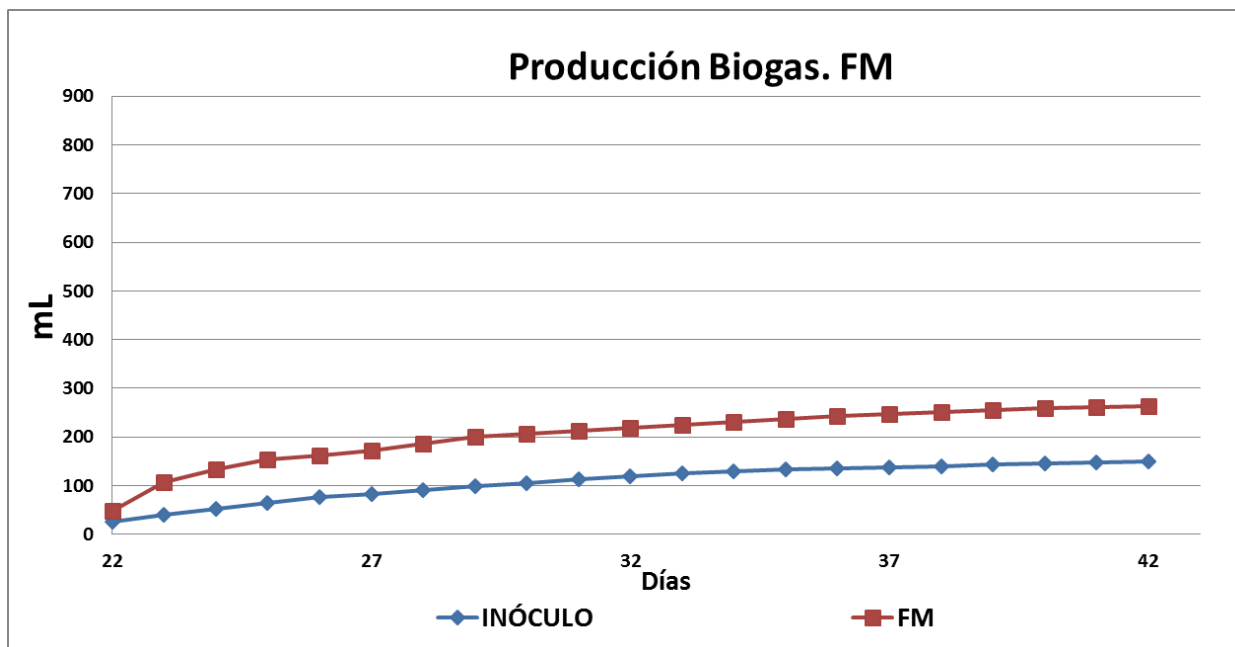
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales.

En la gráfica 209, respecto a la **fase 1**, se observa la producción de biogás que genera el fango mixto. Muestra un crecimiento hasta el día 11, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, llegando a un volumen total de 253 mL. En comparación con el inóculo (197mL) incrementa la producción de biogás en 56 mL.



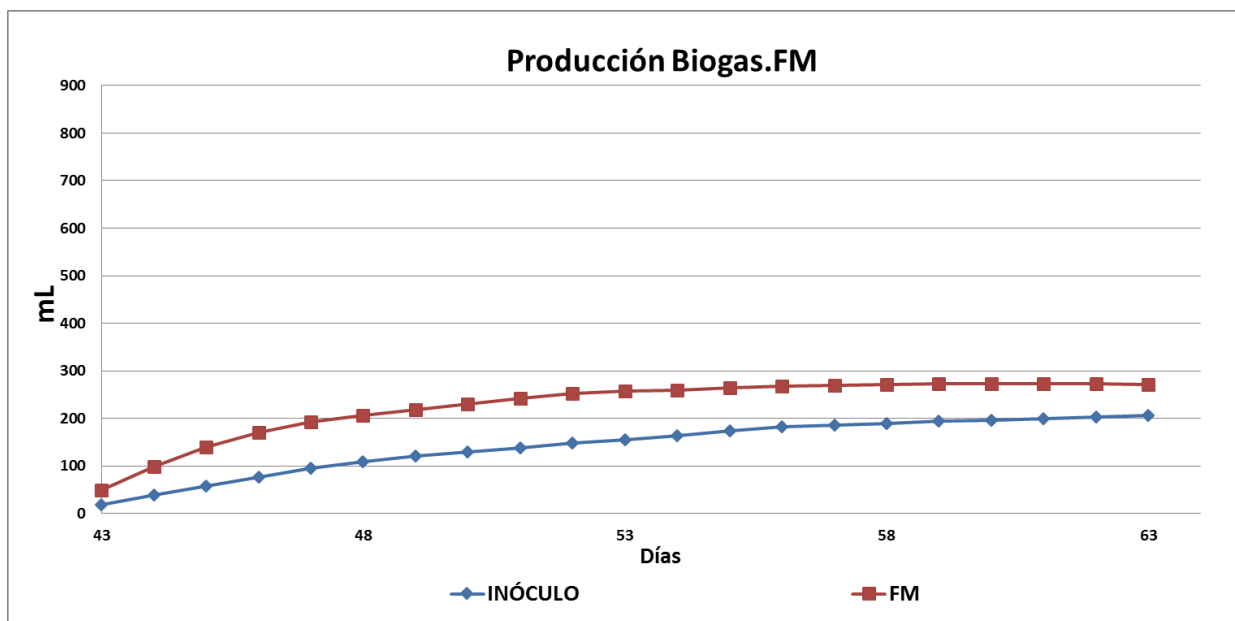
Gráfica 209. Producción Biogás, del Fango Mixto, Co-digestión. Fase 1

En la **fase 2** (gráfica 210), se observa la producción de biogás que genera el fango mixto. Muestra un crecimiento hasta el día 37, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, llegando a un volumen total de 263 mL. En comparación con el inóculo (149mL) incrementa la producción de biogás en 114 mL



Gráfica 210. Producción Biogás Fango Mixto, Co-digestión Fase 2

En la **fase 3** (gráfica 211), se observa la producción de biogás que genera el fango mixto. Muestra un crecimiento hasta el día 51, a partir del cual se estabiliza la producción de biogás, llegando a un volumen total de 272 mL. En comparación con el inóculo incrementa la producción de biogás en 66 mL.

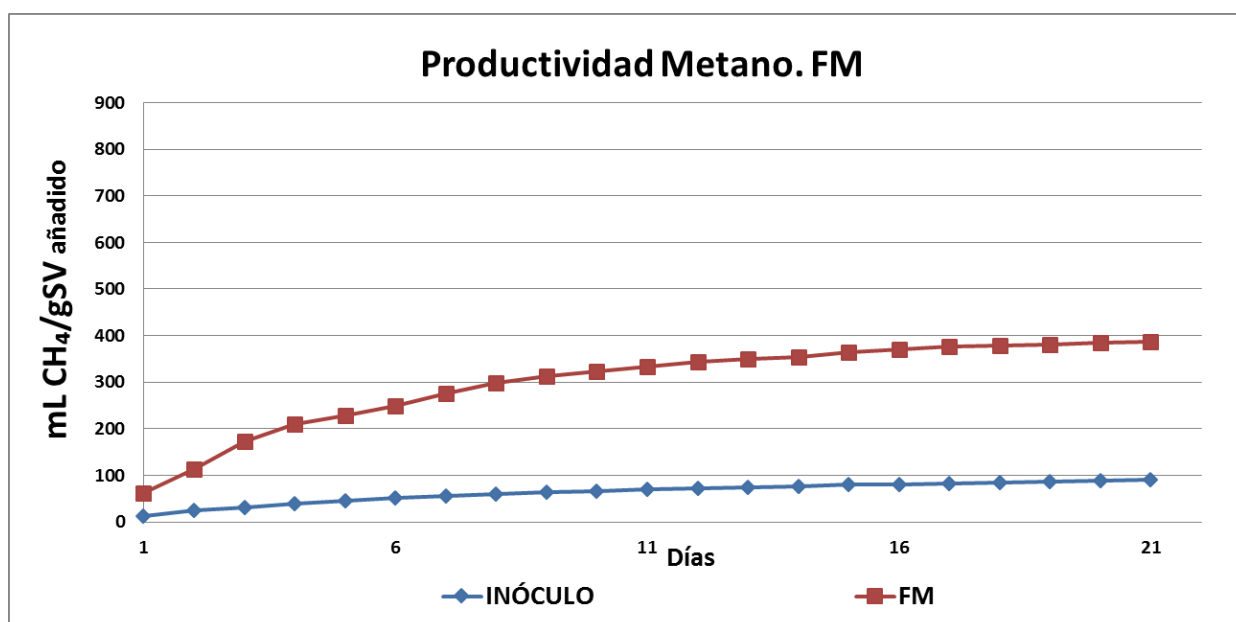


Gráfica 211. Producción Biogás, del Fango Mixto, Co-digestión. Fase 3

## 4.2. Productividad de Metano

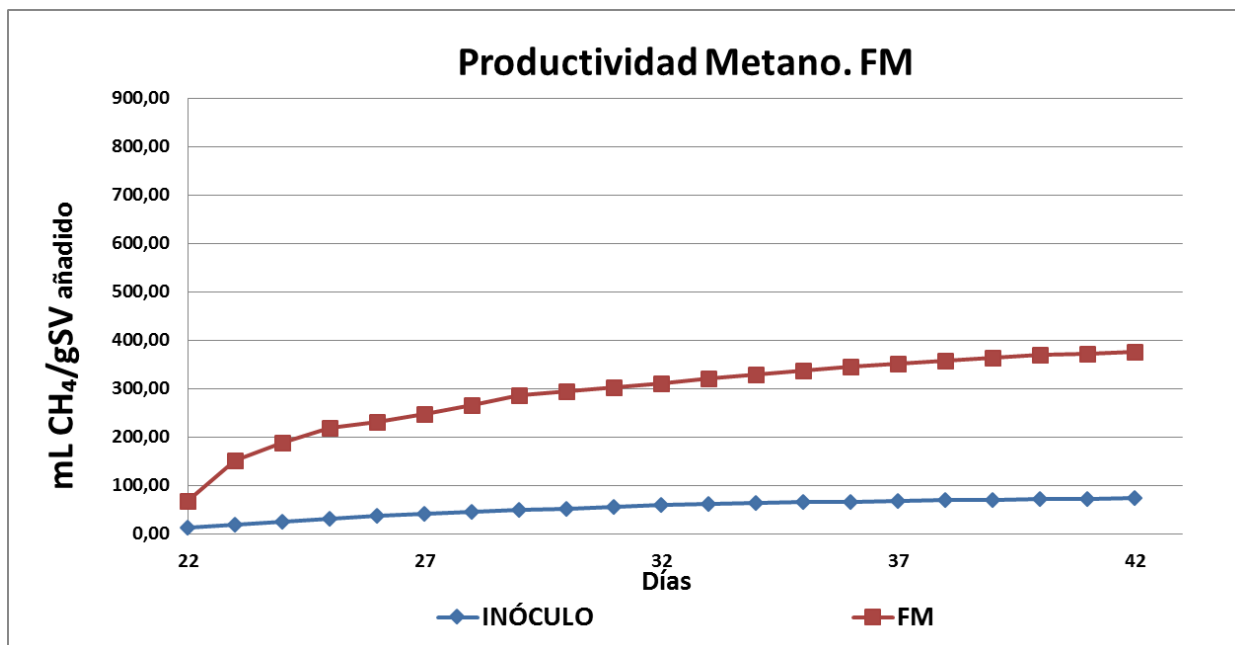
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano para de las distintas fases temporales.

En cuanto a la productividad de metano ( $\text{mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ ) en la **fase 1** (gráfica 212), el lodo de depuradora aumenta significativamente la productividad de metano, llegando a los  $386 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ , tal y como se observa en la gráfica. El porcentaje de metano en el ensayo con fango mixto es del 75%, aumentando en un 20% con respecto al ensayo del inóculo (55%).



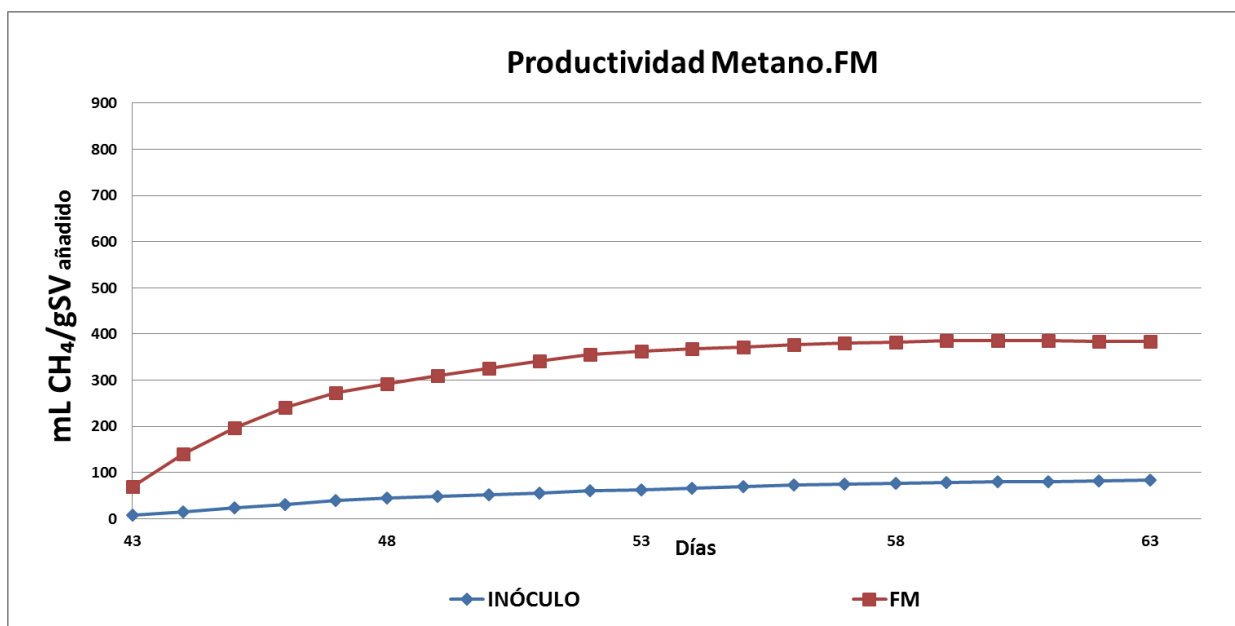
Gráfica 212. Productividad Metano del Fango Mixto, Co-digestión. Fase 1

En la **fase 2** (gráfica 213). La productividad de metano del ensayo de lodo de depuradora aumenta significativamente la productividad de metano, llegando a los  $375 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ , tal y como se observa en la gráfica. El porcentaje de metano en el ensayo con fango mixto es del 70%, aumentando en un 15% con respecto al ensayo del inóculo (55%).



Gráfica 213.Productividad Metano Fango Mixto, Co-digestión Fase 2

En la **fase 3** (gráfica 214). La productividad de metano del ensayo de lodo de depuradora aumenta significativamente la productividad de metano, llegando a los 384 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, tal y como se observa en la gráfica. El porcentaje de metano en el ensayo con fango mixto es del 70%, aumentando en un 15% con respecto al ensayo del inóculo (55%).



Gráfica 214. Productividad Metano del Fango Mixto, Co-digestión. Fase 3



## **Anexo III**

---

### **Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos**



## Anexo III. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos

Los resultados de las analíticas de laboratorio llevadas a cabo con el fin de determinar las características de las mezclas de los residuos orgánicos, así como el inóculo utilizado en cada fase del ensayo. Con respecto a las analíticas, se ha seguido la metodología descrita en el apartado 4.

### 1. Mezclas de residuos orgánicos

En la Tabla 130, se muestran los resultados de las analíticas de laboratorio. Como se recoge en dicha tabla, las mezclas de los residuos utilizados poseen unas características significativamente diferentes, puesto que existe cierta variabilidad entre los resultados analíticos obtenidos para cada uno de ellos. A continuación, se detallan las diferencias más destacables.

En cuanto a los datos del contenido de **sólidos**, el aceite usado de cocina junto con el alperujo es el que posee una mayor proporción, en el caso de sólidos totales  $145.652,36 \pm 0,88 \text{ mgL}^{-1}$ . La mezcla de suero y alperujo tienen una cantidad de sólidos totales,  $98.574,87 \pm 0,89 \text{ mgL}^{-1}$ , siendo inferior en la mezcla de alperujo y alpechín  $79.485,13 \pm 0,88 \text{ mgL}^{-1}$ . En el caso de la mezcla de suero con la glicerina, tanto los ST y SV, presenta un  $72.450,56 \pm 0,89 \text{ mgL}^{-1}$  y  $60.220,36 \pm 0,85 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente. En cambio la mezcla de suero y lixiviado tiene menor cantidad de sólidos,  $21.790,96 \pm 0,90 \text{ mgL}^{-1}$  en ST y,  $17.020,12 \pm 0,76 \text{ mgL}^{-1}$  en SV.

La mezcla de cascara de arroz y lixiviado presenta un gran porcentaje de materia sólida y volátil. El fango mixto presenta menor cantidad de ST y SV que todas las mezclas de residuos orgánicos, siendo de  $16.970,54 \pm 0,85 \text{ mg L}^{-1}$  y  $12.000,18 \pm 0,84 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente.

En términos de **materia orgánica**, es importante mencionar que la mezcla de aceite usado de cocina y alperujo, le corresponde un valor muy elevado  $160.587,74 \pm 0,73 \text{ mgL}^{-1}$ . La mezcla de Alperujo y suero presenta  $112.654,12 \pm 0,77 \text{ mgL}^{-1}$ , un dato bastante elevado. La mezcla de cascara de arroz y lixiviado presenta una DQO alrededor de los  $70.000 \text{ mgL}^{-1}$ , por debajo está la mezcla de lixiviado y suero con  $46.872,45 \pm 0,70 \text{ mgL}^{-1}$ . El fango mixto presentan una DQO, de  $33.038,12 \pm 0,78 \text{ mgL}^{-1}$ . Por otro lado, se puede

observar que existe variabilidad entre los diferentes mezclas de residuos en términos de pH; siendo la más ácida la glicerina y lixiviado ( $3,45 \pm 0,01$ ).

Tabla 130. Caracterización de la mezcla de residuos orgánicos. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos

Parámetros	Unidades	Fango Mixto	Cascara-Lixiviado	SueroB-Alperujo	Alperujo-Alpechín
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	33.038,12 ±0,78	68.756,16 ±0,70	112.654,12 ±0,77	95.538,87 ±0,73
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	16.970,54 ±0,85	57.423,22 ±0,86	98.574,87 ±0,89	79.485,13 ±0,88
<b>Materia Seca</b>	%	1,69	5,74	9,85	7,94
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	12.000,18 ±0,84	45.675,36 ±0,84	74.568,60 ±0,90	65.874,41 ±0,80
<b>Materia Volátil</b>	%	70,71	79,54	75,64	82,87
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	4.970,89 ±0,76	11.748,65 ±0,01	24.006,35 ±0,74	13.611,22 ±0,75
<b>pH</b>		6,32 ±0,01	6,53 ±0,01	6,65 ±0,01	6,43 ±0,01

Parámetros	Unidades	Glicerina-SueroB	Lixiviado-SueroB	Aceite-Alperujo	Glicerina-Lixiviado
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	78.945,12 ±0,75	46.872,45 ±0,70	160.587,74 ±0,73	74.460,63 ±0,73
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	72.450,56 ±0,89	21.790,96 ±0,90	145.652,36 ±0,88	69.160,44 ±0,80
<b>Materia Seca</b>	%	7,24	2,17	14,56	6,91
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	60.220,36 ±0,85	17.020,12 ±0,76	126.785,80 ±0,73	43.340,41 ±0,90
<b>Materia Volátil</b>	%	83,11	78,10	87,04	62,66
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	12.230,89 ±0,74	4.770,32 ±0,77	18.867,55 ±0,71	25.820,88 ±0,76
<b>pH</b>		4,53 ±0,01	4,23 ±0,01	5,55 ±0,01	3,45 ±0,01

## 2. Inóculo

En este apartado, se han reunido los resultados correspondientes a las medidas analíticas realizadas al inóculo que utilizaremos en las fases del ensayo.

En la **fase 1**, para realizar el ensayo BMP, se ha utilizado como fuente de biomasa metanogénica activa fango digerido extraído de los digestores de la EDAR. Su composición se muestra en la tabla 131.

Tabla 131. Inóculo. Ensayo Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

### Inóculo

Parámetros	Unidades	
DQO	mg L <sup>-1</sup>	9.523,15 ±0,63
ST	mg L <sup>-1</sup>	12.400,45 ±0,86
Materia Seca	%	1,24
SV	mg L <sup>-1</sup>	10.280,35 ±0,88
Materia Volátil	%	82,90
SF	mg L <sup>-1</sup>	2.120,26 ±0,92
pH		7,00 ±0,01
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	11,44 ±0,02
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	4.800,34 ±1,02
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	320,22 ±1,01
Relación AGV/Alcalinidad		0,07

En la **fase 2**, se ha utilizado como fuente de biomasa metanogénica activa, fango adaptado extraído de los BMP de la fase 1 de este ensayo, como se ha desarrollado en el apartado material y métodos 4. Su composición se muestra en la tabla 132, en la cual se puede observar que todos los fangos adaptados presentan diferente cantidad de materia orgánica y sólidos, debido al porcentaje de eliminación que se dio en la primera fase. En el caso de la mezcla de aceite y alperujo, es el fango adaptado que mayor DQO presenta (14.875,75 ±0,74 mg L<sup>-1</sup>). En cambio, la mezcla de lixiviado y suero es el que menos, 12.570,56 ±0,73 mg L<sup>-1</sup>.

Tabla 132. Fango adaptado. Ensayo Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

Parámetros	Unidades	Fango Mixto	Cascara-Lixiviado	SueroB-Alperujo	Alperujo-Alpechín
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	13.546,02 ±0,75	13.780,14 ±0,74	13.870,17 ±0,75	13.475,68 ±0,73
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	13.456,12 ±0,88	14.275,09 ±0,85	14.750,23 ±0,88	14.685,45 ±0,86
<b>Materia Seca</b>	%	1,34	1,42	1,47	1,46
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	8.545,02 ±0,88	7.854,89 ±0,86	11.634,36 ±0,84	12.001,74 ±0,82
<b>Materia Volátil</b>	%	63,50	55,01	78,87	81,72
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	4.911,56 ±0,75	6.421,54 ±0,73	3.116,96 ±0,73	2.684,36 ±0,79
<b>pH</b>		7,64 ±0,01	7,81 ±0,01	7,78 ±0,01	7,69 ±0,01
<b>Conductividad</b>	mS cm <sup>-1</sup>	13,36 ±0,02	13,08 ±0,02	13,93 ±0,02	12,98 ±0,02

Parámetros	Unidades	Glicerina-SueroB	Lixiviado-SueroB	Aceite-Alperujo	Glicerina-Lixiviado
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	13.475,23 ±0,72	12.570,56 ±0,73	14.875,75 ±0,74	13.240,11 ±0,70
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	13.475,25 ±0,86	12.650,87 ±0,86	16.740,35 ±0,83	12.780,03 ±0,86
<b>Materia Seca</b>	%	1,34	1,26	1,67	1,27
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	10.904,39 ±0,84	7.683,96 ±0,84	14.864,72 ±0,89	8.910,18 ±0,84
<b>Materia Volátil</b>	%	80,92	60,73	88,79	69,71
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	2.571,41 ±0,79	4.967,77 ±0,75	1.876,44 ±0,75	3.870,29 ±0,74
<b>pH</b>		7,71 ±0,01	7,92 ±0,01	7,74 ±0,01	7,76 ±0,01
<b>Conductividad</b>	mS cm <sup>-1</sup>	13,31 ±0,02	13,42 ±0,02	12,48 ±0,02	12,68 ±0,02

En la **fase 3**, se ha utilizado como fuente de biomasa metanogénica activa el fango adaptado extraído de los BMP de la fase 2 de este ensayo, tal y como se ha desarrollado en el apartado material y métodos 4. Su composición se muestra en la tabla 133, en la cual se puede observar que todos los fangos adaptados presentan diferente cantidad de materia orgánica y sólidos, debido al porcentaje de eliminación que se dio en la primera fase. En el caso de la mezcla de aceite y alperujo, es el fango adaptado que mayor DQO presenta ( $13.278,40 \pm 0,76 \text{ mg L}^{-1}$ ). En cambio, la mezcla de lixiviado y suero es el que menos,  $11.654,47 \pm 0,77 \text{ mg L}^{-1}$ .



Tabla 133. Fango adaptado. Ensayo Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

Parámetros	Unidades	Fango Mixto	Cascara-Lixiviado	SueroB-Alperujo	Alperujo-Alpechín
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	12.546,12 ±0,78	12.987,45 ±0,70	12.985,60 ±0,74	13.021,85 ±0,78
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	11.450,36 ±0,86	11.468,44 ±0,90	14.045,71 ±0,86	14.120,46 ±0,86
<b>Materia Seca</b>	%	1,14	1,14	1,40	1,41
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	7.681,96 ±0,88	8.187,45 ±0,83	12.240,69 ±0,90	11.845,73 ±0,84
<b>Materia Volátil</b>	%	67,08	71,38	87,14	83,88
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	3.769,03 ±0,75	3.281,70 ±0,72	1.805,18 ±0,73	2.275,17 ±0,76
<b>pH</b>		7,64 ±0,01	7,81 ±0,01	7,78 ±0,01	7,69 ±0,01
<b>Conductividad</b>	mS cm <sup>-1</sup>	13,36 ±0,02	13,08 ±0,02	13,93 ±0,02	12,98 ±0,02

Parámetros	Unidades	Glicerina-SueroB	Lixiviado-SueroB	Aceite-Alperujo	Glicerina-Lixiviado
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	12.475,13 ±0,73	11.654,47 ±0,77	13.278,40 ±0,76	12.875,63 ±0,78
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	12.785,65 ±0,82	10.570,66 ±0,80	16.457,39 ±0,82	12.645,70 ±0,84
<b>Materia Seca</b>	%	1,27	1,05	1,64	1,26
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	10.685,71 ±0,88	8.894,84 ±0,83	14.458,82 ±0,90	8.924,91 ±0,88
<b>Materia Volátil</b>	%	83,57	84,14	87,85	70,57
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	2.100,67 ±0,73	1.676,70 ±0,71	1.999,66 ±0,76	3.721,77 ±0,74
<b>pH</b>		7,71 ±0,01	7,92 ±0,01	7,74 ±0,01	7,76 ±0,01
<b>Conductividad</b>	mS cm <sup>-1</sup>	13,31 ±0,02	13,42 ±0,02	12,48 ±0,02	12,68 ±0,02

### 3. Ensayo digestión anaerobia de la mezcla de Residuos orgánicos Fango digerido (Inóculo)

A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1** como se observa en la tabla 134, la eliminación de la materia orgánica en el inoculo es del 28% debido a que este está compuesto por materia orgánica no biodegradable, este es utilizado como blanco.

Tabla 134. Ensayo Inóculo BMP. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

#### Inóculo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	9.523,11 ±0,78	6.879,22 ±0,80	28
ST	mg L <sup>-1</sup>	12.400,45 ±0,85	9.150,33 ±0,81	26
Materia Seca	%	1,24	0,92	
SV	mg L <sup>-1</sup>	10.280,02 ±0,82	8.170,13 ±0,90	21
Materia Volátil	%	82,90	89,29	
pH	mg L <sup>-1</sup>	7,00 ±0,01	7,20 ±0,01	
Conductividad		11,44 ±0,02	11,00 ±0,02	
Alcalinidad	mS cm <sup>-1</sup>	5.120,21 ±1,07	6.310,66 ±1,05	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	410,20 ±0,93	240,87 ±1,00	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	361,33 ±0,93	288,77 ±1,00	
Relación AGV/Alcalinidad		0,08	0,04	

Como se observa en la tabla 135 de la **fase 2**. La eliminación de la materia orgánica en el inoculo es del 19% debido a que está compuesto por materia orgánica no biodegradable. Éste, es utilizado como blanco.

Tabla 135. Ensayo Inóculo BMP. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

### Inóculo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	11.250,11 ±0,70	9.076,01 ±0,72	19
ST	mg L <sup>-1</sup>	12.860,22 ±0,80	9.350,00 ±0,85	27
Materia Seca	%	1,29	0,94	
SV	mg L <sup>-1</sup>	9.780,27 ±0,80	7.210,63 ±0,82	26
Materia Volátil	%	76,05	77,11	
pH	mg L <sup>-1</sup>	7,00 ±0,01	7,20 ±0,01	
Conductividad		11,44 ±0,02	11,00 ±0,02	
Alcalinidad	mS cm <sup>-1</sup>	4.800,11 ±1,02	6.200,33 ±1,00	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	315,86 ±1,04	327,59 ±0,99	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	379,86 ±1,04	393,10 ±0,99	
Relación AGV/Alcalinidad		0,07	0,05	

En la **fase 3** como se observa en la tabla 136, la eliminación de la materia orgánica en el inóculo es del 15% debido a que este está compuesto por materia orgánica no biodegradable, este es utilizado como blanco.

Tabla 136. Ensayo Inóculo BMP. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

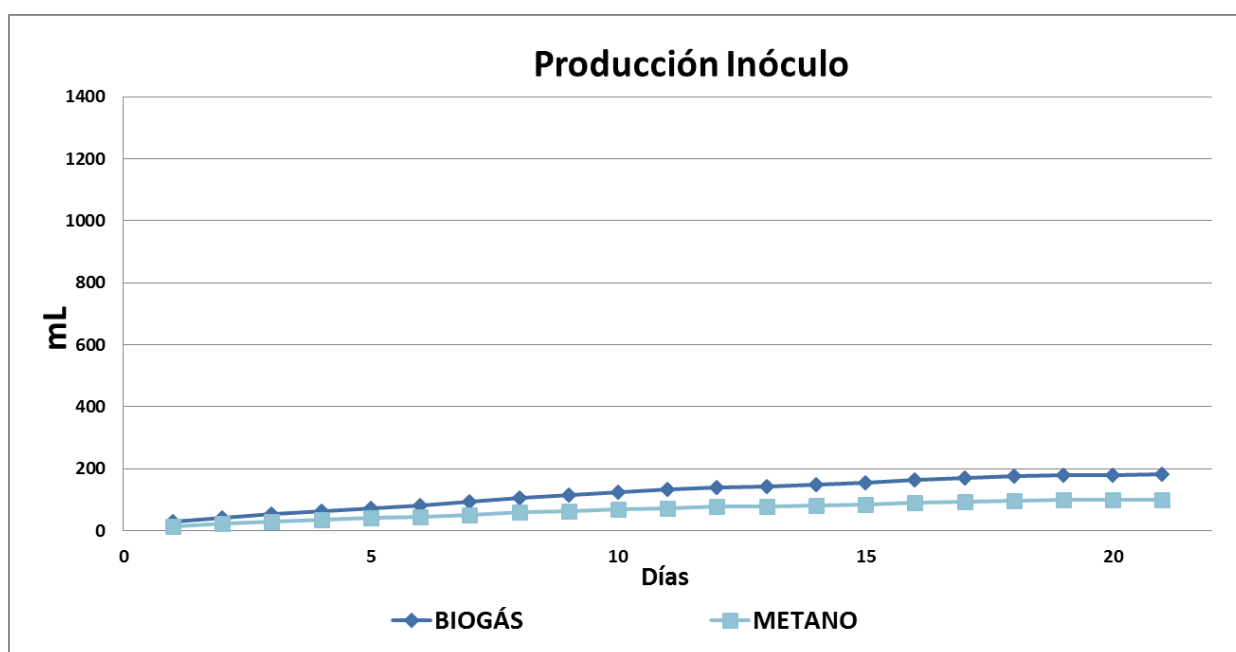
Inóculo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	10.584,10 ±0,75	8.975,04 ±0,78	15
ST	mg L <sup>-1</sup>	10.542,02 ±0,80	9.650,36 ±0,82	8
Materia Seca	%	1,05	0,97	
SV	mg L <sup>-1</sup>	9.001,25 ±0,82	6.967,00 ±0,85	23
Materia Volátil	%	85,38	72,20	
pH	mg L <sup>-1</sup>	7,00 ±0,01	7,20 ±0,01	
Conductividad		11,44 ±0,02	11,00 ±0,02	
Alcalinidad	mS cm <sup>-1</sup>	4.800,55 ±1,04	6.400,47 ±1,00	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	320,96 ±0,92	330,44 ±1,01	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	380,96 ±0,92	395,66 ±1,01	
Relación AGV/Alcalinidad		0,07	0,05	

### 3.1. Producción de Biogás

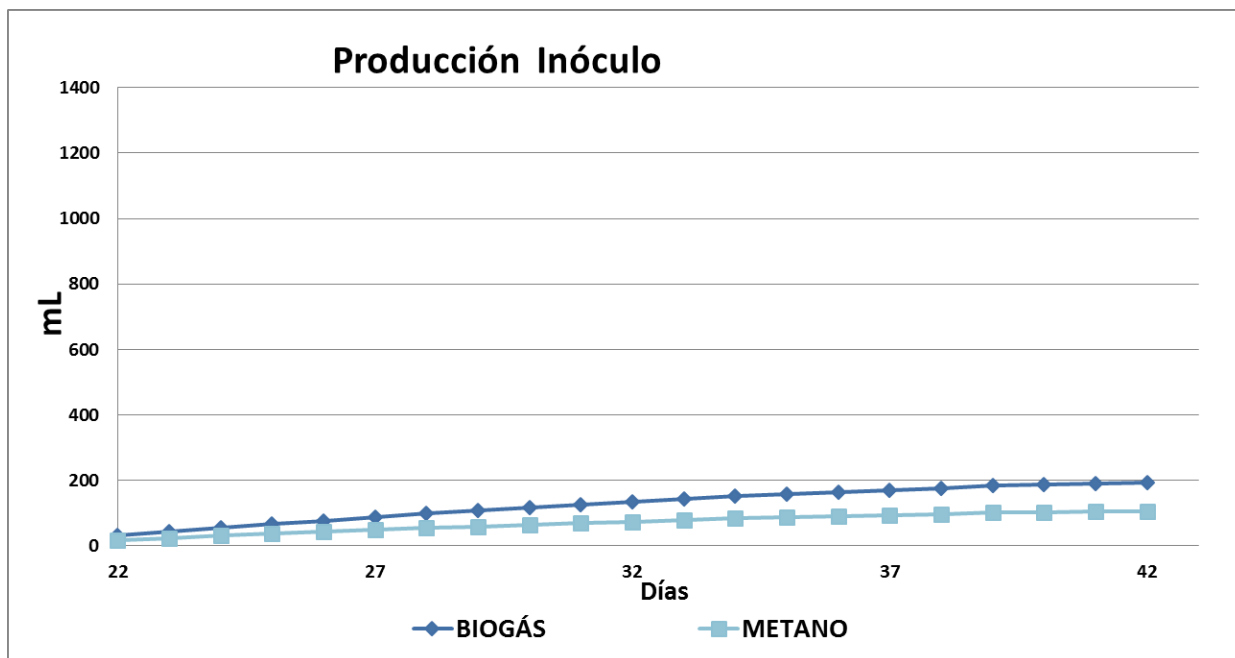
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales.

En la **fase 1**, tal y como se representa en la gráfica 215, la producción de biogás es de 182 mL, el crecimiento en la producción de biogás es lento, estabilizándose a partir del día 16.



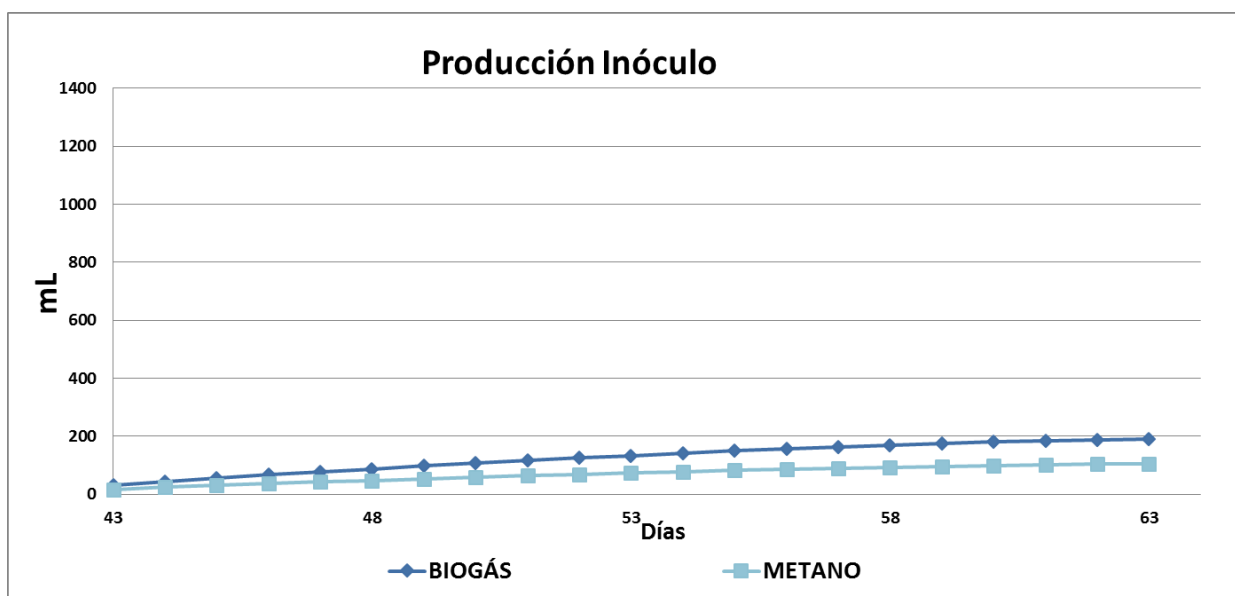
Gráfica 215. Producción Inóculo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

Como se puede observar en la gráfica 216 en la **fase 2**, la producción de biogás es de 193 mL y, el crecimiento en la producción de biogás es lento, estabilizándose a partir del día 37.



Gráfica 216. Producción Inóculo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

En la **fase 3**, como se puede observar en la gráficas 217, la producción de biogás es de 191 mL, el crecimiento en la producción de biogás es lento, estabilizándose a partir del día 59.

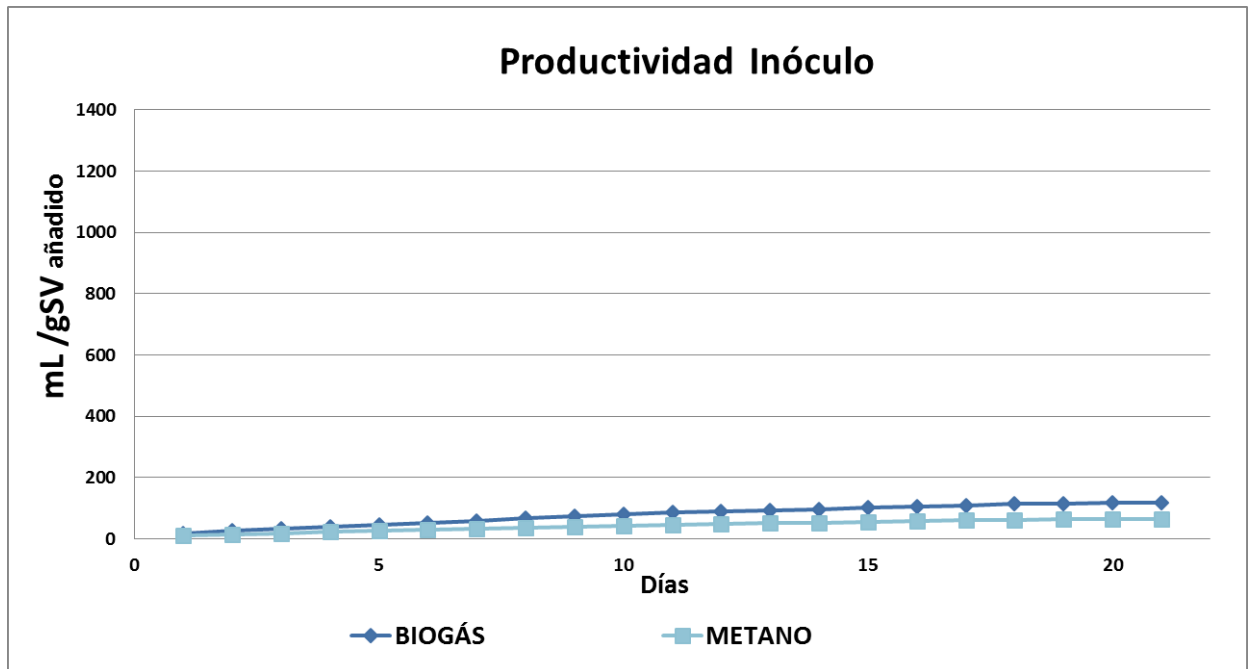


Gráfica 217. Producción Inóculo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3

### 3.2. Productividad de Metano

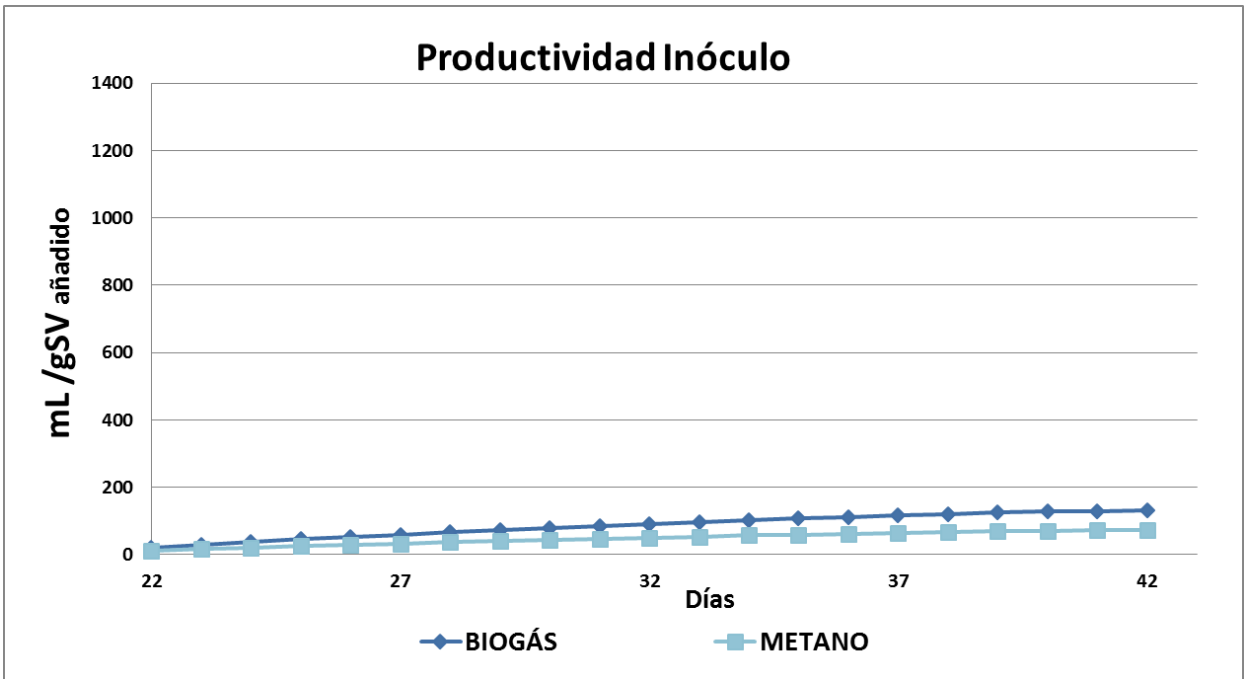
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de las distintas fases temporales.

En la **fase 1** (gráfica 218), la productividad de metano ( $\text{mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ ) es de  $65 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ , en el caso de metano, tiene un porcentaje de 55%.



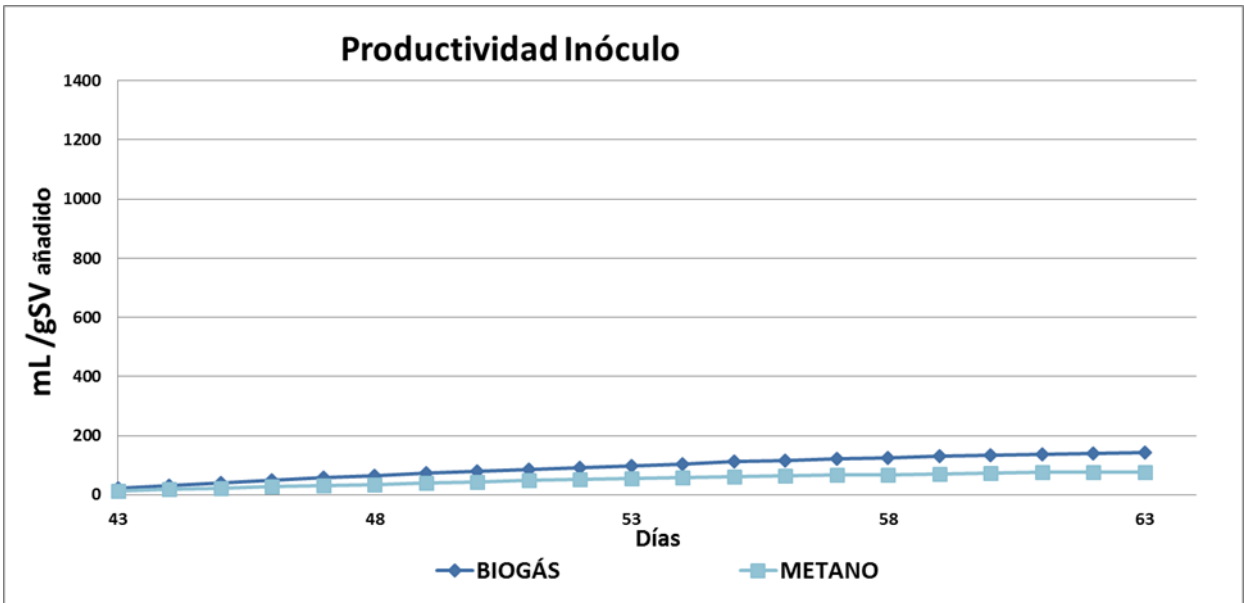
Gráfica 218. Productividad Metano Inóculo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1

En la **fase 2** (gráfica 219), el porcentaje de metano en el biogás es del 55%. La productividad de metano es de 72 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 219. Productividad Metano Inóculo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2

En la **fase 3** (gráfica 220), la productividad de metano es de 70 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>. el porcentaje de metano en el biogás es del 55%.



Gráfica 220. Productividad Metano Inóculo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3



#### 4. .Ensayo Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos con Fango Mixto (EDAR Copero)

A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales.

En la **fase 1** como se observa en la tabla 137, la eliminación de materia orgánica en el lodo de depuradora, presenta una DQO de entrada de  $19.272,11 \pm 0,77 \text{ mgL}^{-1}$  y a la salida una DQO de  $7.985,23 \pm 0,80$ . Por lo tanto, presenta una eliminación del 59%. Por otro lado, la eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es del 34% y 33% respectivamente. El pH y la conductividad no varían durante el ensayo.

Tabla 137. Ensayo Fango Mixto Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. Fase 1

##### Fango Mixto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$19.272,11 \pm 0,77$	$7.985,23 \pm 0,80$	59
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$14.270,18 \pm 0,81$	$9.390,19 \pm 0,86$	34
Materia Seca	%	1,43	0,94	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$9.565,00 \pm 0,89$	$6.470,00 \pm 0,84$	32
Materia Volátil	%	67,03	68,90	
pH	$\text{mg L}^{-1}$	$7,00 \pm 0,01$	$7,00 \pm 0,01$	
Conductividad		$12,00 \pm 0,02$	$11,98 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mS cm}^{-1}$	$3.100,09 \pm 1,00$	$5.980,85 \pm 1,05$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$403,79 \pm 1,02$	$446,55 \pm 0,97$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$484,55 \pm 1,02$	$535,86 \pm 0,97$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,13	0,07	

En la **fase 2** como se observa en la tabla 138, la eliminación de materia orgánica en el lodo de depuradora presenta una DQO de entrada de  $21.450,12 \pm 0,74 \text{ mg L}^{-1}$  y a la salida una DQO de  $10.576,36 \pm 0,79$ . Por lo tanto, presenta una eliminación del 51%. Por otro lado, la eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es del 34%. El pH y la conductividad no varían durante el ensayo. La alcalinidad incrementa hasta  $6.000,72 \pm 1,01 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ , al finalizar el ensayo.

Tabla 138. Ensayo Fango Mixto Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. Fase 2

### Fango Mixto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$21.450,12 \pm 0,74$	$10.576,36 \pm 0,79$	51
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$15.745,78 \pm 0,82$	$10.451,65 \pm 0,90$	34
Materia Seca	%	1,57	1,05	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$10.640,11 \pm 0,86$	$7.042,56 \pm 0,89$	34
Materia Volátil	%	67,58	67,38	
pH	$\text{mg L}^{-1}$	$7,00 \pm 0,01$	$7,00 \pm 0,01$	
Conductividad		$12,00 \pm 0,02$	$11,98 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mS cm}^{-1}$	$3.100,12 \pm 1,05$	$6.000,72 \pm 1,01$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$440,66 \pm 0,97$	$350,41 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$527,87 \pm 0,97$	$420,65 \pm 1,00$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,14	0,06	

Como se observa en la tabla 139 de la **fase 3**, la eliminación de materia orgánica en el lodo de depuradora, presenta una DQO de entrada de  $20.245,62 \pm 0,77 \text{ mg L}^{-1}$  y a la salida una DQO de  $9.860,51 \pm 0,71 \text{ mg L}^{-1}$ . Por lo tanto, presenta una eliminación del 51%. Por otro lado la eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es del 34%. El pH y la conductividad no varían durante el ensayo. La alcalinidad incrementa hasta  $6.000,72 \pm 1,01 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ , al finalizar el ensayo.

Tabla 139. Ensayo Fango Mixto Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. Fase 3

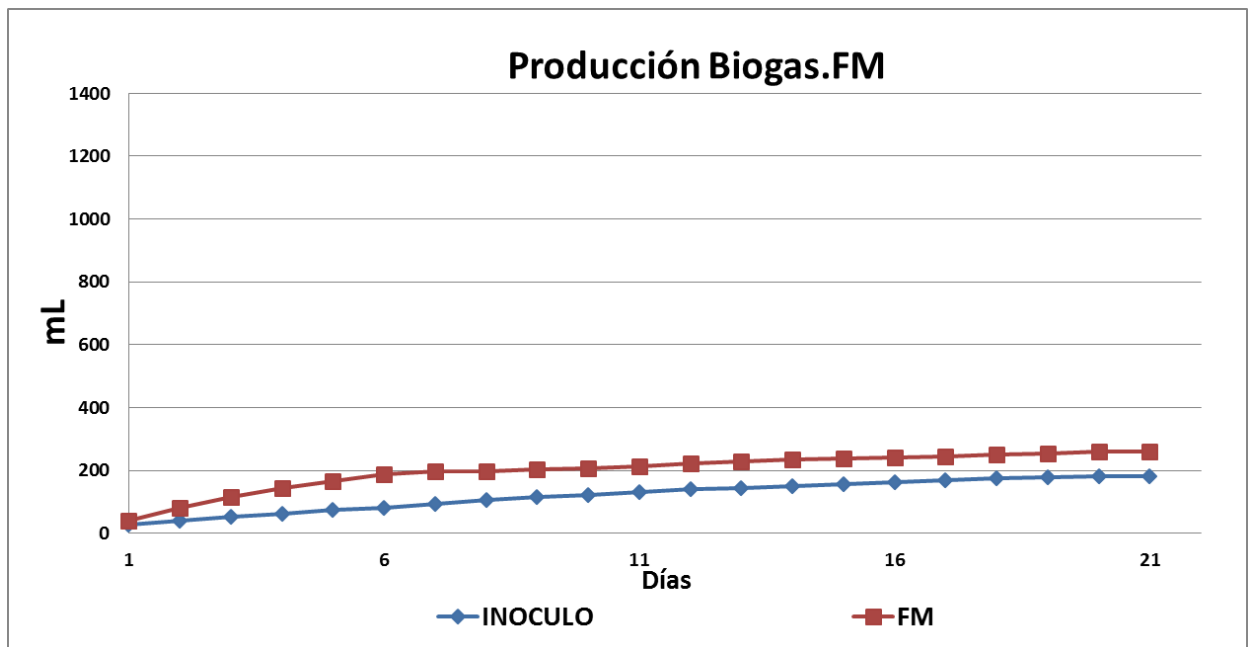
### Fango Mixto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$20.245,62 \pm 0,77$	$9.860,51 \pm 0,71$	51
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$15.480,42 \pm 0,85$	$10.340,23 \pm 0,80$	33
Materia Seca	%	1,55	1,03	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$10.340,48 \pm 0,86$	$6.500,65 \pm 0,82$	37
Materia Volátil	%	66,80	62,86	
pH	$\text{mg L}^{-1}$	$7,00 \pm 0,01$	$7,00 \pm 0,01$	
Conductividad		$12,00 \pm 0,02$	$11,98 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mS cm}^{-1}$	$3.340,48 \pm 1,04$	$6.200,74 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$405,78 \pm 1,02$	$350,09 \pm 0,96$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$490,12 \pm 1,02$	$416,02 \pm 0,96$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,12	0,06	

#### 4.1. Producción de Biogás

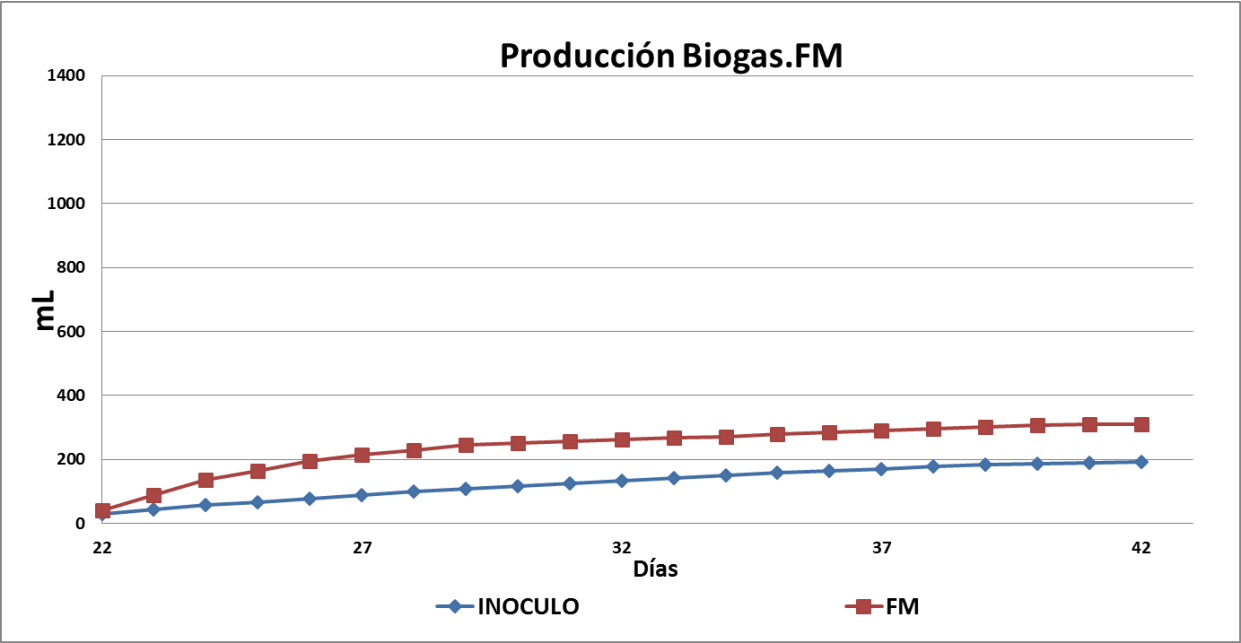
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales.

En la **fase 1** (gráfica 221), se representa la producción de biogás que genera el fango mixto. Presenta un crecimiento hasta el día 6, a partir del cual se estabiliza. La producción total de biogás es de 261 mL. En comparación con el inóculo (182mL) incrementa la producción de biogás en 56 mL.



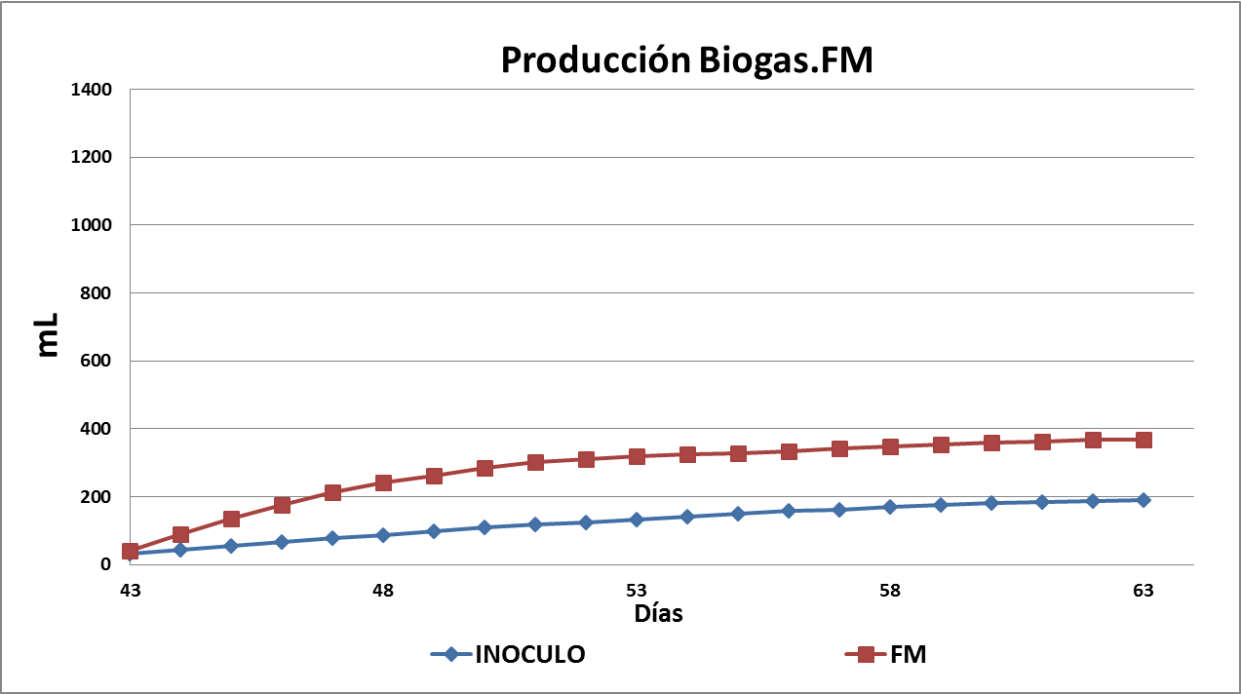
Gráfica 221. Producción Biogás, del Fango Mixto, Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. Fase 1

En la **fase 2** (gráfica 222), se representa la producción de biogás que genera el fango mixto. Presenta un crecimiento hasta el día 29, a partir del cual se estabiliza. La producción total de biogás es de 309 mL. En comparación con el inóculo (193mL) incrementa la producción de biogás en 116 mL.



Gráfica 222. Producción Biogás, del Fango Mixto, Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. Fase 2

En la **fase 3** (gráfica 223), se representa la producción de biogás que genera el fango mixto. Presenta un crecimiento hasta el día 51, a partir del cual se estabiliza. La producción total de biogás es de 367 mL. En comparación con el inóculo (191mL) incrementa la producción de biogás en 176 mL.

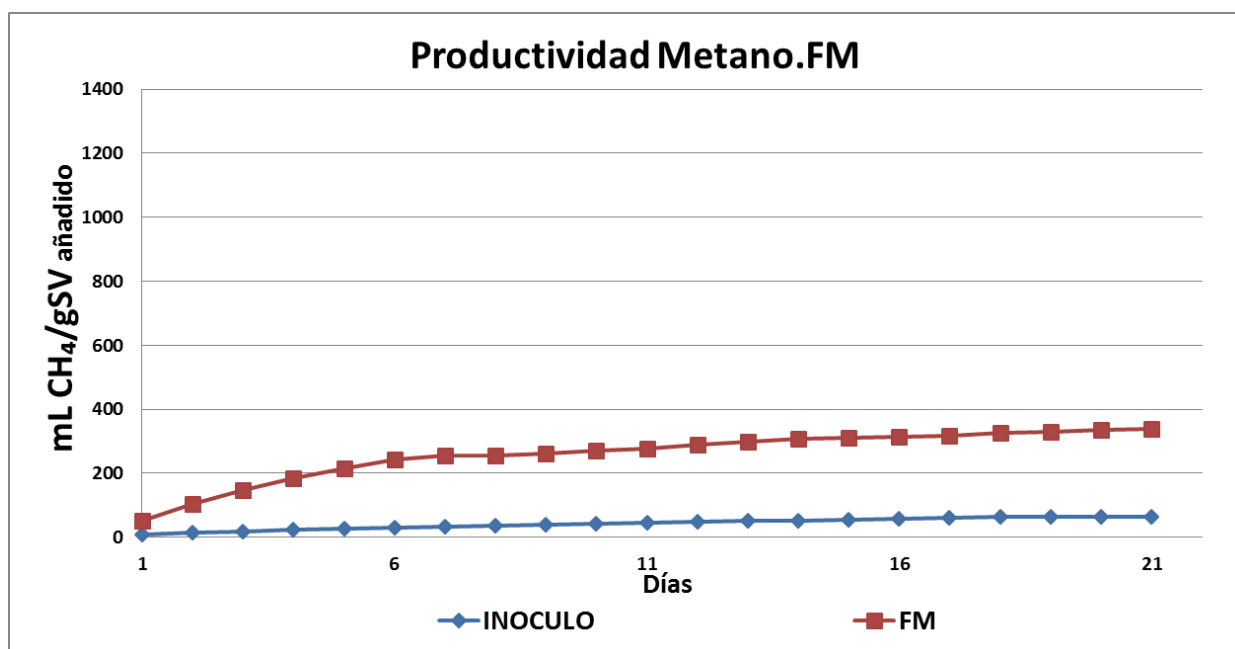


Gráfica 223. Producción Biogás, del Fango Mixto, Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. Fase 3

## 4.2. Productividad de Metano

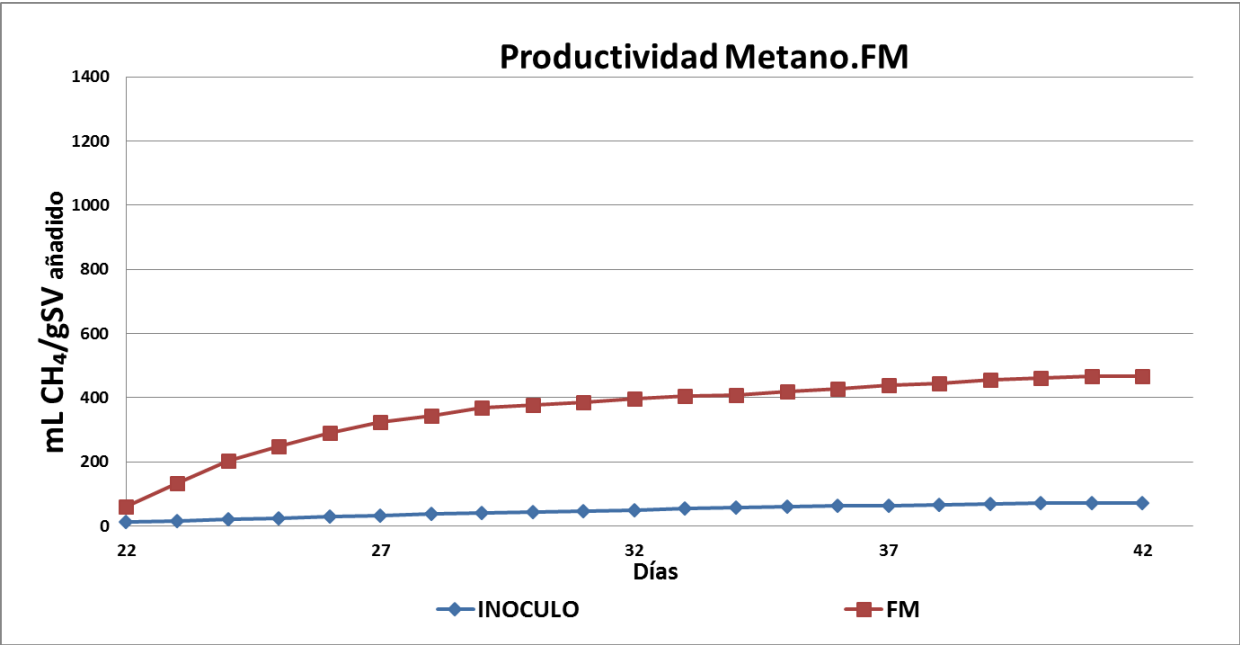
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de metano de las distintas fases temporales.

En cuanto a la productividad de metano de la **fase 1** (gráfica 224), el fango mixto aumenta significativamente la productividad de metano llegando a los 386 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, tal y como se observa en la gráfica. El porcentaje de metano en el ensayo con fango mixto es del 70%, aumentando en un 15% con respecto al ensayo del inóculo (55%).



Gráfica 224. Productividad Metano del Fango Mixto, Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. Fase 1

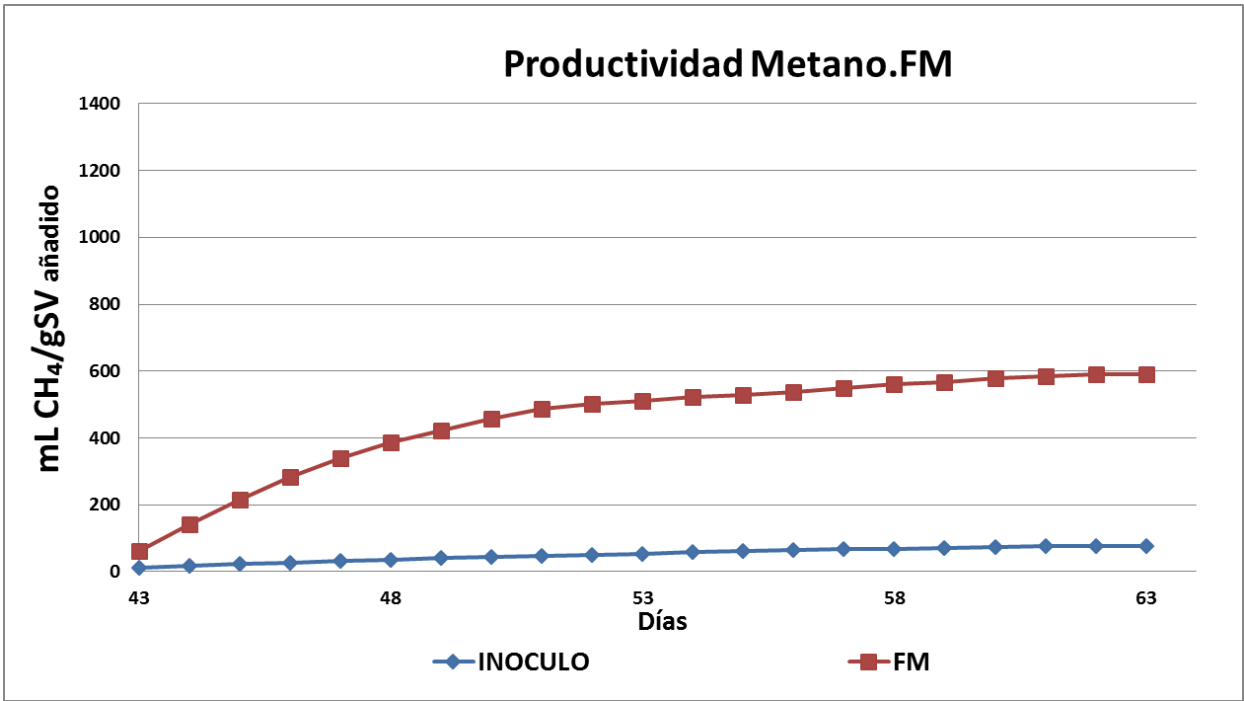
En cuanto a la productividad de metano de la **fase 2** (gráfica 225), el fango mixto aumenta significativamente la productividad de metano llegando a los 466 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, tal y como se observa en la gráfica. El porcentaje de metano en el ensayo con fango mixto es del 75%, aumentando en un 20% con respecto al ensayo del inóculo (55%).



Gráfica 225. Productividad Metano del Fango Mixto, Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. Fase 2



En la **fase 3**, el fango mixto aumenta significativamente la productividad de metano llegando a los 589 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, tal y como se observa en la gráfica 226. El porcentaje de metano en el ensayo con fango mixto es del 70%, aumentando en un 15% con respecto al ensayo del inóculo (55%).



Gráfica 226. Productividad Metano del Fango Mixto, Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos. Fase 3



## **Anexo IV**

---

### **Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica**



## **Anexo IV. Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica**

Los resultados de las analíticas de laboratorio llevadas a cabo con el fin de determinar las características de las mezclas de los residuos orgánicos, así como el inoculo utilizado en cada fase del ensayo. Con respecto a las analíticas, se ha seguido la metodología descrita en el capítulo 4.

### **1. Fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica**

En cada fase se ha utilizado un fango mixto nuevo, por lo que la composición y la caracterización de la mezclas de fango mixto junto con las mezclas de residuos orgánicos varía en cada fase del ensayo. A continuación, se muestran los resultados de las analíticas de laboratorio llevadas a cabo con el fin de determinar las características de los residuos empleados en este trabajo. Con respecto a las analíticas, se ha seguido la metodología descrita en el apartado 4.

En la **fase 1**, tal y como se recoge de los datos recopilados en la tabla 140, los residuos utilizados poseen unas características significativamente diferentes puesto que existe cierta variabilidad entre los resultados analíticos obtenidos para cada uno de ellos. A continuación, se detallan las diferencias más destacables.

En cuanto a los datos del contenido de **sólidos**, en la mezcla de fango mixto, aceite usado de cocina Y el alperujo es el que posee una mayor proporción, en el caso de sólidos totales  $99.985,55 \pm 0,81 \text{ mgL}^{-1}$ . La mezcla de fango mixto, suero y alperujo tienen una cantidad de sólidos totales,  $70.540,36 \pm 0,85 \text{ mgL}^{-1}$ , siendo inferior en la mezcla de fango mixto, alperujo y alpechín  $63.145,77 \pm 0,86 \text{ mgL}^{-1}$ . En el caso de la mezcla de fango mixto, suero con la glicerina, tanto los ST y SV, presenta un  $49.975,48 \pm 0,80 \text{ mgL}^{-1}$  y  $39.645,63 \pm 0,86 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente. En cambio la mezcla de fango mixto, suero y lixiviado tiene menor cantidad de sólidos,  $35.471,54 \pm 0,86 \text{ mgL}^{-1}$  en ST y,  $25.410,74 \pm 0,81 \text{ mgL}^{-1}$  en SV.

La mezcla de fango mixto, cascara de arroz y lixiviado presenta un  $49.570,19 \pm 0,88 \text{ mg L}^{-1}$ . El fango mixto presenta menor cantidad de ST y SV que todas las mezclas de residuos orgánicos, siendo de  $16.970,54 \pm 0,82 \text{ mg L}^{-1}$  y  $12.000,18 \pm 0,88 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente.

En términos de **materia orgánica**, es importante mencionar que la mezcla de fango mixto, aceite usado de cocina y alperujo, le corresponde un valor muy elevado  $96.813,15 \pm 0,75 \text{mgL}^{-1}$ . La mezcla de fango mixto, alperujo y suero presenta  $73.265,14 \pm 0,80 \text{mgL}^{-1}$ , un dato bastante elevado. La mezcla de fango mixto, cascara de arroz y lixiviado presenta una DQO alrededor de los  $50.000 \text{mgL}^{-1}$ , la mezcla de fango mixto, glicerina y suero tiene una DQO de  $55.991,24 \pm 0,77 \text{mgL}^{-1}$ . El fango mixto presenta una DQO, de  $33.038,12 \pm 0,75 \text{mgL}^{-1}$ .

Tabla 140. Caracterización Residuos Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

Parámetros	Unidades	Fango Mixto	FM-Cascara-Lixiviado	FM-SueroB-Alperujo	FM-Alperujo-Alpechín
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	33.038,12 ±0,75	50.756,85 ±0,72	73.265,14 ±0,80	64.238,69 ±0,77
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	16.970,56 ±0,82	49.570,19 ±0,88	70.540,36 ±0,85	63.145,77 ±0,86
<b>Materia Seca</b>	%	1,69	4,95	7,05	6,31
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	12.000,85 ±0,88	37.520,11 ±0,86	62.123,47 ±0,90	54.212,70 ±0,81
<b>Materia Volátil</b>	%	70,71	75,69	88,06	85,85
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	4.970,01 ±0,74	12.050,63 ±0,72	8.417,50 ±0,76	8.933,80 ±0,73

Parámetros	Unidades	FM-Glicerina-SueroB	FM-Lixiviado-SueroB	FM-Aceite-Alperujo	FM-Glicerina-Lixiviado
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	55.991,24 ±0,77	39.872,35 ±0,79	96.813,15 ±0,75	53.750,26 ±0,72
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	49.975,48 ±0,80	35.471,54 ±0,86	99.985,55 ±0,81	33.120,64 ±0,81
<b>Materia Seca</b>	%	4,99	3,54	9,99	3,31
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	39.645,63 ±0,86	25.410,74 ±0,81	88.450,75 ±0,90	17.542,80 ±0,90
<b>Materia Volátil</b>	%	79,32	71,63	88,46	52,96
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	10.330,87 ±0,76	10.061,90 ±0,76	11.535,93 ±0,79	15.578,11 ±0,76

En la **fase 2**, tal y como se recoge de los datos recopilados en la tabla 141, los residuos utilizados poseen unas características significativamente diferentes puesto que existe cierta variabilidad entre los resultados analíticos obtenidos para cada uno de ellos. A continuación, se detallan las diferencias más destacables.

En términos del contenido de **sólidos**, en la mezcla de fango mixto, aceite usado de cocina Y el alperujo es el que posee una mayor proporción, en el caso de sólidos totales  $99.590,72 \pm 0,86 \text{ mgL}^{-1}$ . La mezcla de fango mixto, suero y alperujo tienen una cantidad de sólidos totales,  $69.240,56 \pm 0,81 \text{ mgL}^{-1}$ , siendo inferior en la mezcla de fango mixto, alperujo y alpechín  $62.910,36 \pm 0,85 \text{ mgL}^{-1}$ . En el caso de la mezcla de fango mixto, suero con la glicerina, tanto los ST y SV, presenta un  $49.410,26 \pm 0,88 \text{ mgL}^{-1}$  y  $38.980,38 \pm 0,90 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente. En cambio la mezcla de fango mixto, suero y lixiviado tiene menor cantidad de sólidos,  $35.930,68 \pm 0,87 \text{ mgL}^{-1}$  en ST y,  $24.460,91 \pm 0,85 \text{ mgL}^{-1}$  en SV.

La mezcla de fango mixto junto con cascara de arroz y lixiviado presenta un  $48.750,46 \pm 0,90 \text{ mg L}^{-1}$ . El fango mixto presenta menor cantidad de ST y SV que todas las mezclas de residuos orgánicos, siendo de  $17.021,25 \pm 0,82 \text{ mg L}^{-1}$  y  $12.456,36 \pm 0,89 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente.

En términos de **materia orgánica**, es importante mencionar que la mezcla de fango mixto, aceite usado de cocina y alperujo, le corresponde un valor muy elevado  $96.518,56 \pm 0,79 \text{ mgL}^{-1}$ . La mezcla de fango mixto, alperujo y suero presenta  $72.552,36 \pm 0,73 \text{ mgL}^{-1}$ , un dato bastante elevado. La mezcla de fango mixto, cascara de arroz y lixiviado presenta una DQO de  $50.603,26 \pm 0,79 \text{ mgL}^{-1}$ , la mezcla de fango mixto, glicerina y suero siendo tiene una DQO de  $55.6975,12 \pm 0,78 \text{ mgL}^{-1}$ . El fango mixto presenta una DQO, de  $32.450,11 \pm 0,78 \text{ mgL}^{-1}$ .



Tabla 141. Caracterización Residuos Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

Parámetros	Unidades	Fango Mixto	FM-Cascara-Lixiviado	FM-SueroB-Alperujo	FM-Alperujo-Alpechín
DQO	mg L <sup>-1</sup>	32.450,11 ±0,78	50.603,26 ±0,79	72.552,36 ±0,73	63.995,15 ±0,78
ST	mg L <sup>-1</sup>	17.021,25 ±0,82	48.750,46 ±0,90	69.240,56 ±0,81	62.910,36 ±0,85
Materia Seca	%	1,70	4,87	6,92	6,29
SV	mg L <sup>-1</sup>	12.456,36 ±0,89	36.420,60 ±0,87	60.660,71 ±0,85	53.800,45 ±0,90
Materia Volátil	%	73,18	74,70	87,60	85,51
SF	mg L <sup>-1</sup>	4.565,47 ±0,75	12.330,89 ±0,74	8.580,98 ±0,76	9.110,50 ±0,74

Parámetros	Unidades	FM-Glicerina-SueroB	FM-Lixiviado-SueroB	FM-Aceite-Alperujo	FM-Glicerina-Lixiviado
DQO	mg L <sup>-1</sup>	55.6975,12 ±0,78	39.661,35 ±0,71	96.518,56 ±0,79	53.455,47 ±0,76
ST	mg L <sup>-1</sup>	49.410,26 ±0,88	35.930,68 ±0,87	99.590,72 ±0,86	31.770,60 ±0,81
Materia Seca	%	4,94	3,59	9,95	3,17
SV	mg L <sup>-1</sup>	38.980,38 ±0,90	24.460,91 ±0,85	88.150,21 ±0,83	15.300,56 ±0,86
Materia Volátil	%	78,89	68,07	88,51	48,15
SF	mg L <sup>-1</sup>	10.430,47 ±0,75	11.470,46 ±0,70	11.440,01 ±0,75	16.470,83 ±0,73

En la **fase 3**, tal y como se recoge de los datos recopilados en la tabla 142, los residuos utilizados poseen unas características significativamente diferentes puesto que existe cierta variabilidad entre los resultados analíticos obtenidos para cada uno de ellos. A continuación, se detallan las diferencias más destacables.

En cuanto a los datos del contenido de **sólidos**, en la mezcla de fango mixto, aceite usado de cocina Y el alperujo es el que posee una mayor proporción, en el caso de sólidos totales  $97.650,05 \pm 0,78 \text{ mgL}^{-1}$ . La mezcla de fango mixto, suero y alperujo tienen una cantidad de sólidos totales,  $68.750,20 \pm 0,88 \text{ mgL}^{-1}$ , siendo inferior en la mezcla de fango mixto, alperujo y alpechín  $60.210,50 \pm 0,85 \text{ mgL}^{-1}$ . En el caso de la mezcla de fango mixto, suero con la glicerina, tanto los ST y SV, presenta un  $49.050,42 \pm 0,83 \text{ mgL}^{-1}$  y  $37.450,48 \pm 0,84 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente. En cambio la mezcla de fango mixto, suero y lixiviado tiene menor cantidad de sólidos,  $35.930,68 \pm 0,87 \text{ mgL}^{-1}$  en ST y,  $24.460,91 \pm 0,85 \text{ mgL}^{-1}$  en SV.

La mezcla de fango mixto, cascara de arroz y lixiviado presenta un  $34.510,83 \pm 0,80 \text{ mg L}^{-1}$ . El fango mixto presenta menor cantidad de ST y SV que todas las mezclas de residuos orgánicos, siendo de  $16.987,21 \pm 0,85 \text{ mg L}^{-1}$  y  $12.456,36 \pm 0,88 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente. En términos de **materia orgánica**, es importante mencionar que la mezcla de fango mixto, aceite usado de cocina y alperujo, le corresponde un valor muy elevado  $96.063,11 \pm 0,79 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$ . La mezcla de fango mixto, alperujo y suero presenta  $71.092,63 \pm 0,74 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$ , un dato bastante elevado. La mezcla de fango mixto, cascara de arroz y lixiviado presenta una DQO de  $49.978,41 \pm 0,75 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$ , la mezcla de fango mixto, glicerina y suero siendo tiene una DQO de  $55.242,23 \pm 0,75 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$ . El fango mixto presenta una DQO, de  $31.540,12 \pm 0,78 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$

Tabla 142. Caracterización Residuos Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

Parámetros	Unidades	Fango Mixto	FM-Cascara-Lixiviado	FM-SueroB-Alperujo	FM-Alperujo-Alpechín
DQO	mg L <sup>-1</sup>	31.540,12 ±0,78	49.978,41 ±0,75	71.092,63 ±0,74	63.560,05 ±0,76
ST	mg L <sup>-1</sup>	16.987,21 ±0,85	46.850,87 ±0,86	68.750,20 ±0,88	60.210,50 ±0,85
Materia Seca	%	1,69	4,68	6,87	6,02
SV	mg L <sup>-1</sup>	12.456,36 ±0,88	36.450,48 ±0,90	60.450,12 ±0,86	52.450,96 ±0,82
Materia Volátil	%	73,32	77,80	87,92	87,11
SF	mg L <sup>-1</sup>	4.531,45 ±0,74	10.400,56 ±0,75	8.300,02 ±0,76	7.760,78 ±0,70

Parámetros	Unidades	FM-Glicerina-SueroB	FM-Lixiviado-SueroB	FM-Aceite-Alperujo	FM-Glicerina-Lixiviado
DQO	mg L <sup>-1</sup>	55.242,23 ±0,75	39.206,74 ±0,78	96.063,11 ±0,79	52.780,42 ±0,76
ST	mg L <sup>-1</sup>	49.050,42 ±0,83	34.510,83 ±0,80	97.650,05 ±0,78	32.458,53 ±0,79
Materia Seca	%	4,90	3,45	9,76	3,24
SV	mg L <sup>-1</sup>	37.450,48 ±0,84	23.900,50 ±0,86	87.450,26 ±0,79	19.560,87 ±0,80
Materia Volátil	%	76,35	69,25	89,55	60,26
SF	mg L <sup>-1</sup>	11.600,69 ±0,76	10.610,06 ±0,78	10.200,39 ±0,78	12.898,63 ±0,82

## 2. Inóculo

En este apartado, se han reunido los resultados correspondientes a las medidas analíticas realizadas al inóculo que utilizaremos en las fases del ensayo.

En la **fase 1**, para realizar el ensayo BMP, se ha utilizado como fuente de biomasa metanogénica activa fango digerido extraído de los digestores de la EDAR. Su composición se muestra en la tabla 143.

Tabla 143. Caracterización Inóculo. Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica

### Inóculo

Parámetros	Unidades	
DQO	mg L <sup>-1</sup>	9.523,15 ±0,63
ST	mg L <sup>-1</sup>	12.400,45 ±0,86
Materia Seca	%	1,24
SV	mg L <sup>-1</sup>	10.280,35 ±0,88
Materia Volátil	%	82,90
SF	mg L <sup>-1</sup>	2.120,26 ±0,92
pH		7,00 ±0,01
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	11,44 ±0,02
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	4.800,34 ±1,02
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	320,22 ±1,01
Relación AGV/Alcalinidad		0,07

En la **fase 2**, se ha utilizado como fuente de biomasa metanogénica activa, fango adaptado extraído de los BMP de la fase 1 de este ensayo, como se ha desarrollado en el apartado material y métodos 4. Su composición se muestra en la tabla 144, en la cual se puede observar que todos los fangos adaptados presentan diferente cantidad de materia orgánica y sólidos, debido al porcentaje de eliminación que se dio en la primera fase. En el caso de la mezcla de fango mixto, aceite y alperujo, es el fango adaptado que mayor DQO presenta (15.760,41 ±0,70 mg L<sup>-1</sup>). En cambio, la mezcla de lixiviado y suero es el que menos, 12.987,52 ±0,74 mg L<sup>-1</sup>.

Tabla 144. Caracterización Inóculo. Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

Parámetros	Unidades	Fango Mixto	FM-Cascara-Lixiviado	FM-SueroB-Alperujo	FM-Alperujo-Alpechín
DQO	mg L <sup>-1</sup>	13.546,02 ±0,75	13.475,48 ±0,77	14.050,94 ±0,74	14.256,75 ±0,75
ST	mg L <sup>-1</sup>	13.456,12 ±0,88	14.275,56 ±0,85	13.950,56 ±0,84	13.750,87 ±0,82
Materia Seca	%	1,34	1,42	1,39	1,37
SV	mg L <sup>-1</sup>	8.545,02 ±0,88	9.845,72 ±0,89	9.875,84 ±0,90	9.780,21 ±0,84
Materia Volátil	%	63,50	68,96	70,78	71,12
SF	mg L <sup>-1</sup>	4.911,56 ±0,75	4.430,87 ±0,77	4.075,17 ±0,75	3.970,02 ±0,72
pH		7,64 ±0,01	7,81 ±0,01	7,78 ±0,01	7,69 ±0,01
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	13,36 ±0,02	13,08 ±0,02	13,93 ±0,02	12,98 ±0,02

Parámetros	Unidades	FM-Glicerina-SueroB	FM-Lixiviado-SueroB	FM-Aceite-Alperujo	FM-Glicerina-Lixiviado
DQO	mg L <sup>-1</sup>	13.450,11 ±0,75	12.987,52 ±0,74	15.760,41 ±0,70	13.450,63 ±0,75
ST	mg L <sup>-1</sup>	12.870,23 ±0,88	12.680,96 ±0,82	14.578,36 ±0,89	14.050,77 ±0,87
Materia Seca	%	1,28	1,26	1,45	1,40
SV	mg L <sup>-1</sup>	8.450,45 ±0,90	8.450,47 ±0,89	9.754,55 ±0,85	7.650,88 ±0,84
Materia Volátil	%	65,65	66,64	66,90	54,44
SF	mg L <sup>-1</sup>	4.420,96 ±0,75	4.230,23 ±0,71	4.824,45 ±0,75	6.400,03 ±0,74
pH		7,71 ±0,01	7,92 ±0,01	7,74 ±0,01	7,76 ±0,01
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	13,31 ±0,02	13,42 ±0,02	12,48 ±0,02	12,68 ±0,02

En la **fase 3**, se ha utilizado como fuente de biomasa metanogénica activa el fango adaptado extraído de los BMP de la fase 2 de este ensayo, tal y como se ha desarrollado en el apartado material y métodos 4. Su composición se muestra en la tabla 145, en la cual se puede observar que todos los fangos adaptados presentan diferente cantidad de materia orgánica y sólidos, debido al porcentaje de eliminación que se dio en la primera fase. En el caso de la mezcla de fango mixto, aceite y alperujo, es el fango adaptado que mayor DQO presenta ( $15.470,69 \pm 0,70 \text{ mg L}^{-1}$ ). En cambio, el fango mixto es el que menos,  $12.546,12 \pm 0,78 \text{ mg L}^{-1}$ .

Tabla 145. Caracterización Inóculo. Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

Parámetros	Unidades	Fango Mixto	FM-Cascara-Lixiviado	FM-SueroB-Alperujo	FM-Alperujo-Alpechín
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	12.546,12 ±0,78	13.210,56 ±0,72	13.995,74 ±0,72	14.120,36 ±0,71
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	11.450,36 ±0,86	14.300,78 ±0,85	14.210,66 ±0,86	13.450,78 ±0,83
<b>Materia Seca</b>	%	1,14	1,43	1,42	1,34
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	7.681,96 ±0,88	9.150,63 ±0,88	9.750,63 ±0,90	9.674,99 ±0,90
<b>Materia Volátil</b>	%	67,08	63,98	68,61	71,92
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	3.769,03 ±0,75	5.150,22 ±0,76	4.460,55 ±0,76	3.776,75 ±0,76
<b>pH</b>		7,64 ±0,01	7,81 ±0,01	7,78 ±0,01	7,69 ±0,01
<b>Conductividad</b>	mS cm <sup>-1</sup>	13,36 ±0,02	13,08 ±0,02	13,93 ±0,02	12,98 ±0,02

Parámetros	Unidades	FM-Glicerina-SueroB	FM-Lixiviado-SueroB	FM-Aceite-Alperujo	FM-Glicerina-Lixiviado
<b>DQO</b>	mg L <sup>-1</sup>	13.560,02 ±0,74	13.001,23 ±0,76	15.470,69 ±0,70	13.576,75 ±0,75
<b>ST</b>	mg L <sup>-1</sup>	12.870,18 ±0,85	12.570,18 ±0,88	14.674,87 ±0,81	13.789,41 ±0,83
<b>Materia Seca</b>	%	1,28	1,25	1,46	1,37
<b>SV</b>	mg L <sup>-1</sup>	8.640,89 ±0,89	8.523,05 ±0,90	9.678,63 ±0,83	8.012,63 ±0,88
<b>Materia Volátil</b>	%	67,13	67,80	65,95	58,10
<b>SF</b>	mg L <sup>-1</sup>	4.230,75 ±0,76	4.047,58 ±0,73	4.996,75 ±0,70	5.777,50 ±0,75
<b>pH</b>		7,71 ±0,01	7,92 ±0,01	7,74 ±0,01	7,76 ±0,01
<b>Conductividad</b>	mS cm <sup>-1</sup>	13,31 ±0,02	13,42 ±0,02	12,48 ±0,02	12,68 ±0,02

### 3. Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fango digerido (Inóculo)

A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

En la **fase 1** como se observa en la tabla 146, la eliminación de la materia orgánica en el inóculo es del 28% debido a que este está compuesto por materia orgánica no biodegradable, este es utilizado como blanco.

Tabla 146. Ensayo Inóculo BMP. Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

#### Inóculo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	9.523,11 ±0,78	6.879,22 ±0,80	28
ST	mg L <sup>-1</sup>	12.400,45 ±0,85	9.150,33 ±0,81	26
Materia Seca	%	1,24	0,92	
SV	mg L <sup>-1</sup>	10.280,02 ±0,82	8.170,13 ±0,90	21
Materia Volátil	%	82,90	89,29	
pH		7,00 ±0,01	7,20 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	11,44 ±0,02	11,00 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	5.120,21 ±1,07	6.310,66 ±1,05	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	410,20 ±0,93	240,87 ±1,00	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	361,33 ±0,93	288,77 ±1,00	
Relación AGV/Alcalinidad		0,08	0,04	



En la **fase 2** como se observa en la tabla 147, la eliminación de la materia orgánica en el inoculo es del 19% debido a que está compuesto por materia orgánica no biodegradable. Éste, es utilizado como blanco.

Tabla 147. Ensayo Inóculo. Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

#### Inóculo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	11.250,11 ±0,70	9.076,01 ±0,72	19
ST	mg L <sup>-1</sup>	12.860,22 ±0,80	9.350,00 ±0,85	27
Materia Seca	%	1,29	0,94	
SV	mg L <sup>-1</sup>	9.780,27 ±0,80	7.210,63 ±0,82	26
Materia Volátil	%	76,05	77,11	
pH		7,00 ±0,01	7,20 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	11,44 ±0,02	11,00 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	4.800,11 ±1,02	6.200,33 ±1,00	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	315,86 ±1,04	327,59 ±0,99	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	379,86 ±1,04	393,10 ±0,99	
Relación AGV/Alcalinidad		0,07	0,05	

En la **fase 3** como se observa en la tabla 148, la eliminación de la materia orgánica en el inóculo es del 15% debido a que este está compuesto por materia orgánica no biodegradable, este es utilizado como blanco.

Tabla 148. Ensayo Inóculo. Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

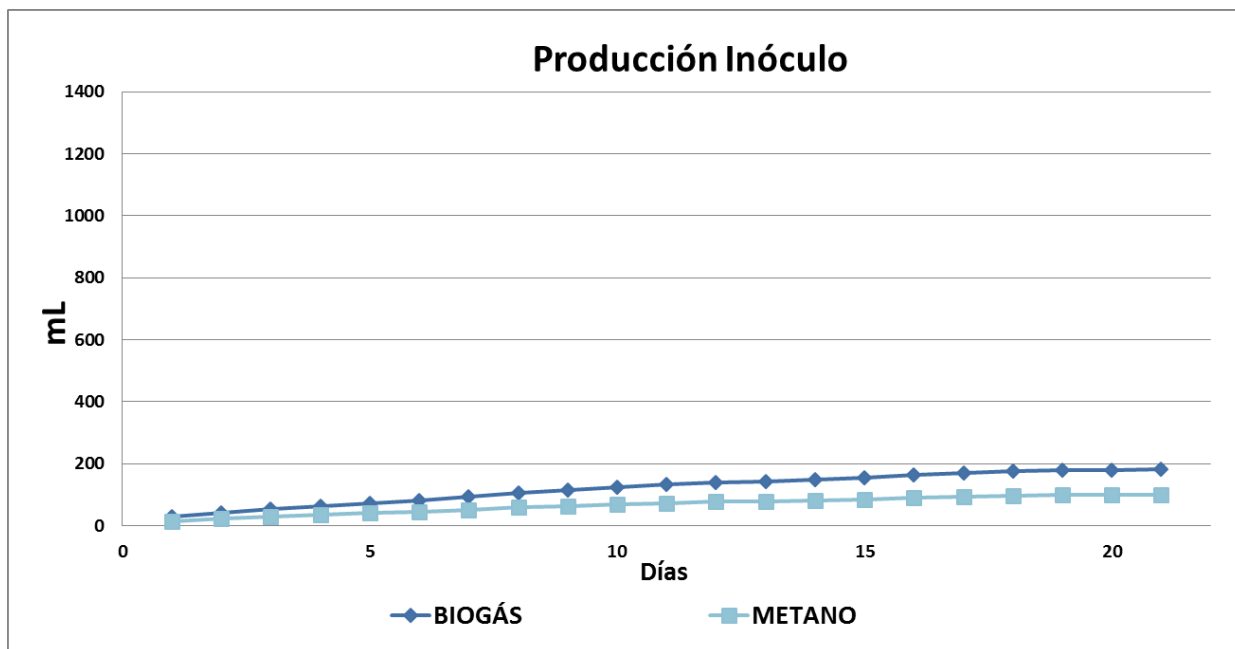
### Inóculo

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	mg L <sup>-1</sup>	10.584,10 ±0,75	8.975,04 ±0,78	15
ST	mg L <sup>-1</sup>	10.542,02 ±0,80	9.650,36 ±0,82	8
Materia Seca	%	1,05	0,97	
SV	mg L <sup>-1</sup>	9.001,25 ±0,82	6.967,00 ±0,85	23
Materia Volátil	%	85,38	72,20	
pH		7,00 ±0,01	7,20 ±0,01	
Conductividad	mS cm <sup>-1</sup>	11,44 ±0,02	11,00 ±0,02	
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	4.800,55 ±1,04	6.400,47 ±1,00	
AGV	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	320,96 ±0,92	330,44 ±1,01	
AGV	mg CH <sub>3</sub> COOH L <sup>-1</sup>	380,96 ±0,92	395,66 ±1,01	
Relación AGV/Alcalinidad		0,07	0,05	

### 3.1. Producción de Biogás

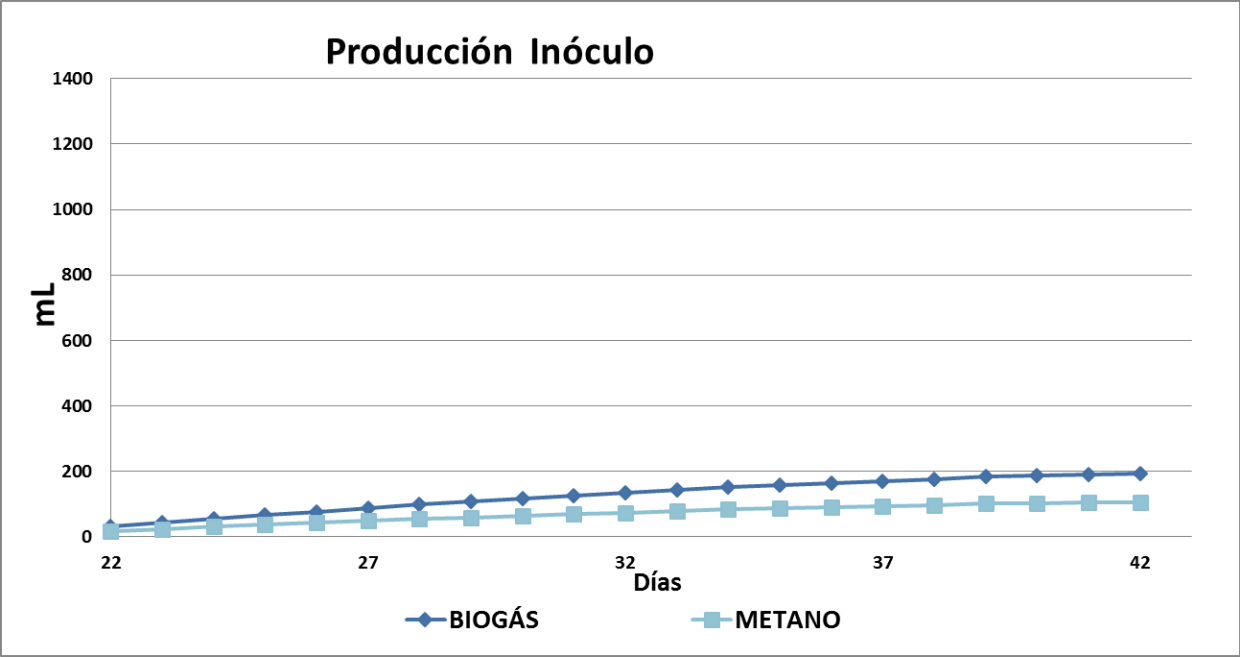
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales

En la **fase 1** (gráfica 227), la producción de biogás es de 182 mL, el crecimiento en la producción de biogás es lento, estabilizándose a partir del día 16.



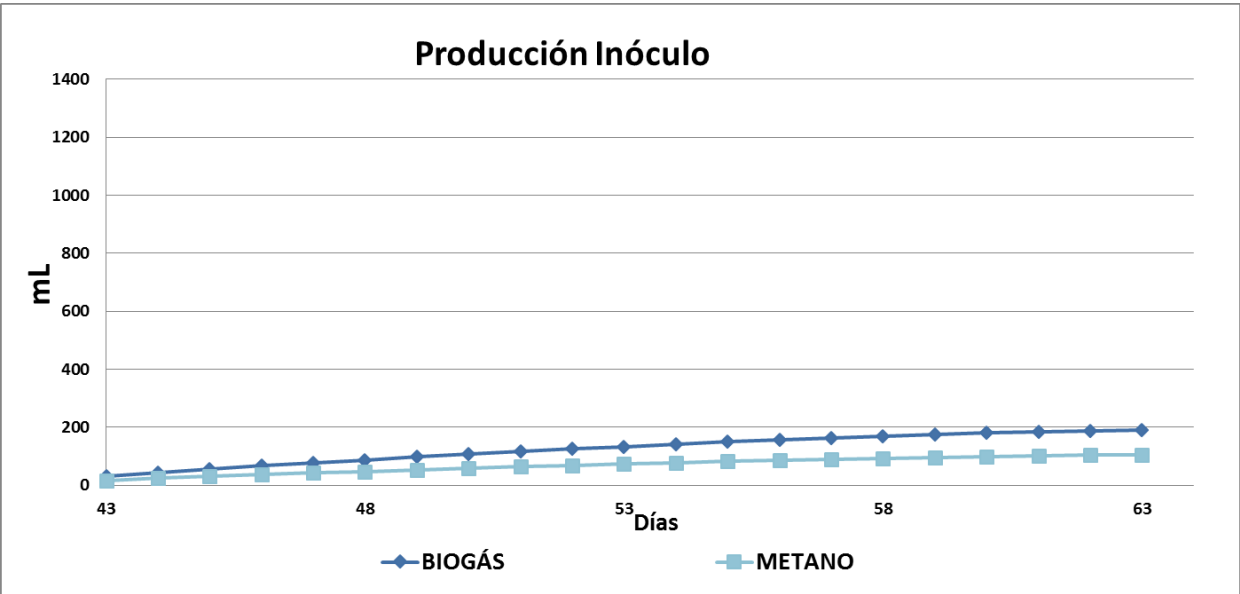
Gráfica 227. Producción Inóculo. Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

En la **fase 2** (gráfica 228), la producción de biogás es de 193 mL y, el crecimiento en la producción de biogás es lento, estabilizándose a partir del día 37.



Gráfica 228.Producción Inóculo. Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

En la **fase 3**, como se puede observar en la gráfica 229, la producción de biogás es de 191 mL, el crecimiento en la producción de biogás es lento, estabilizándose a partir del día 59.

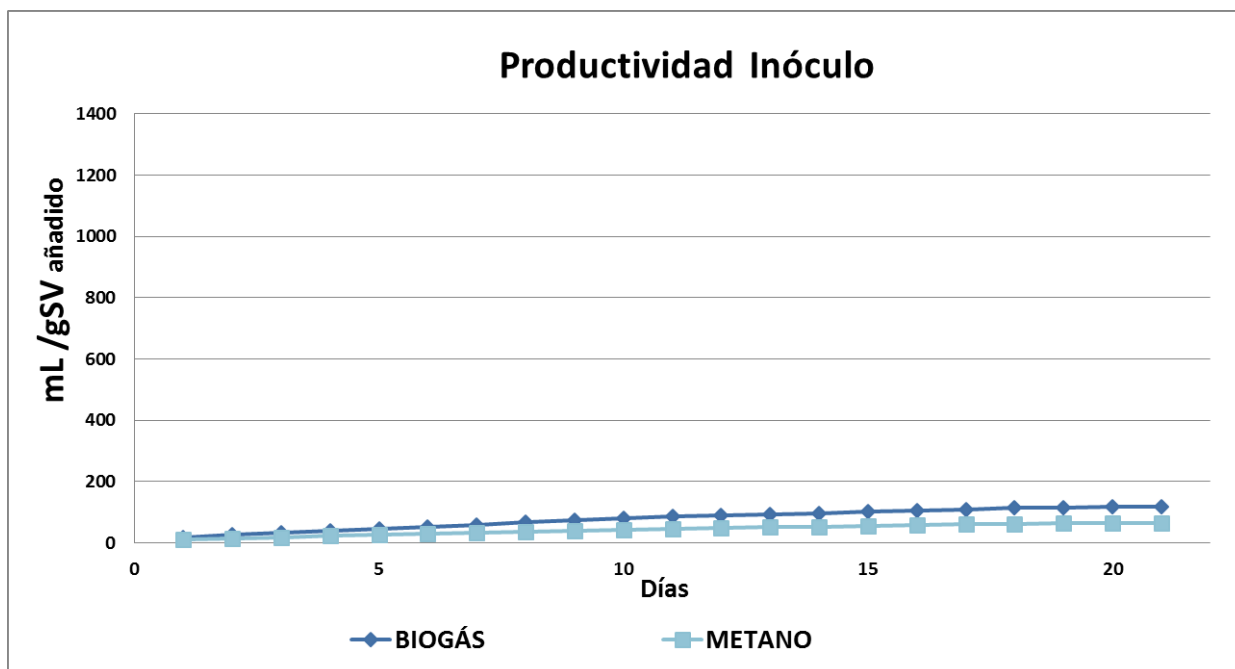


Gráfica 229.Producción Inóculo. Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

### 3.2. Productividad de Metano

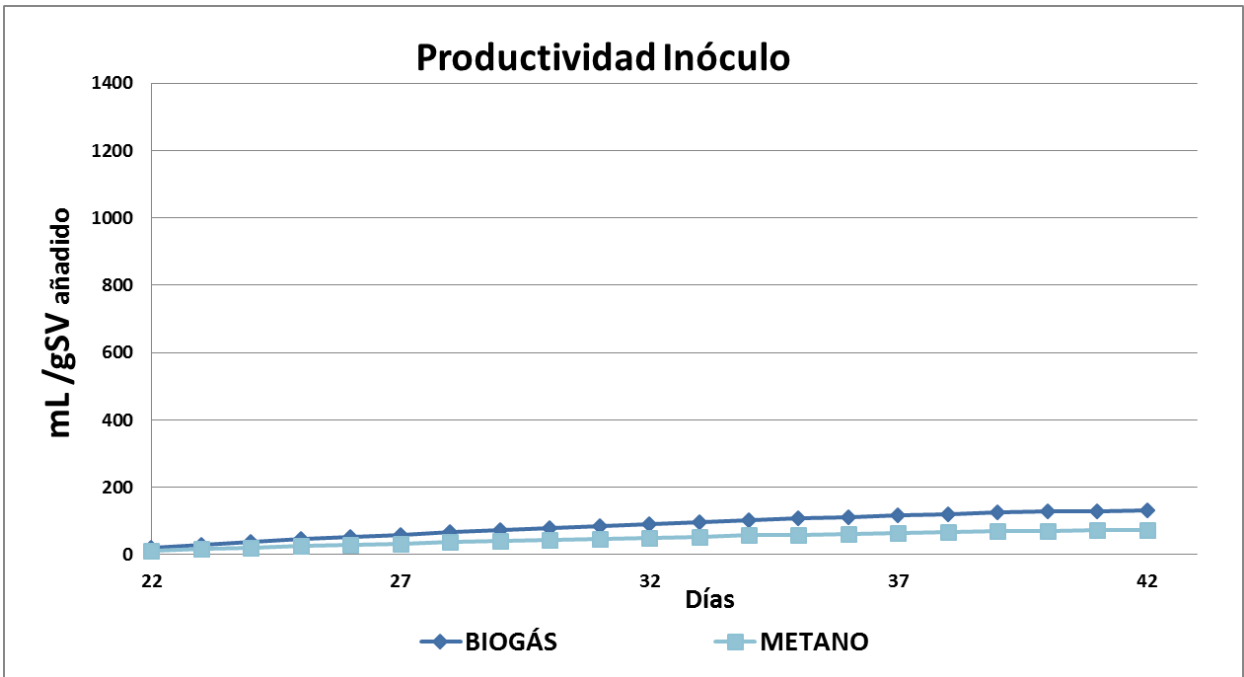
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de las distintas fases temporales.

En cuanto a la productividad de metano de la **fase 1** (gráfica 230). La productividad de metano es de 65 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, en el caso de metano, tiene un porcentaje de 55%.



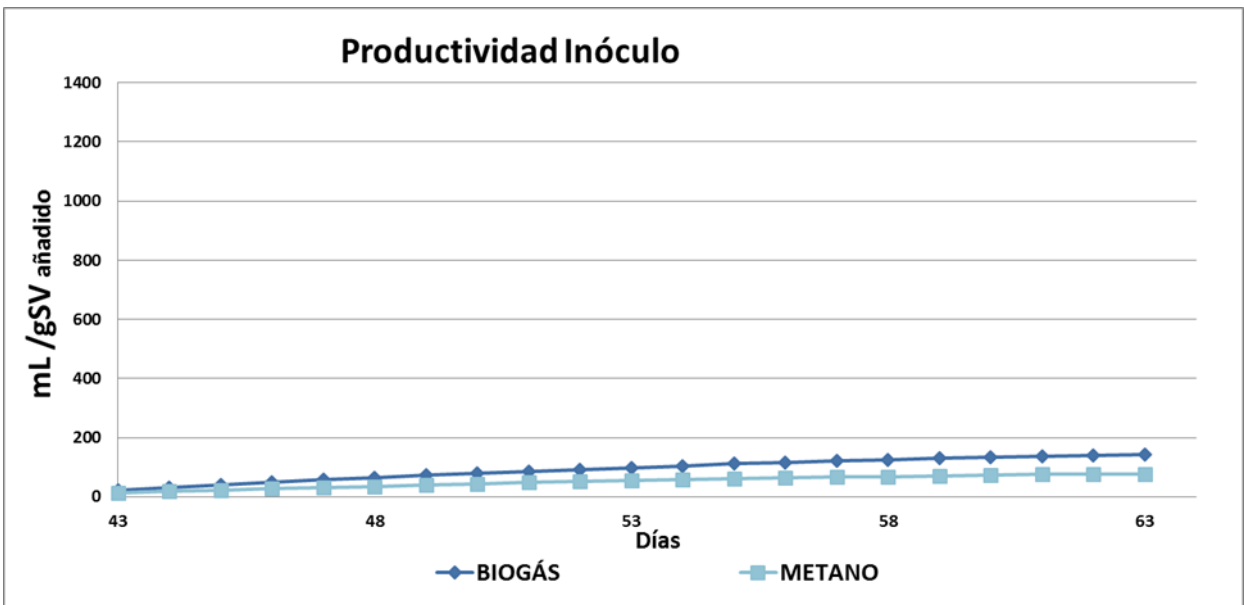
Gráfica 230. Productividad Metano Inóculo. Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1

En la **fase 2** (gráfica 231). El porcentaje de metano en el biogás es del 55%. La productividad de metano es de 72 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.



Gráfica 231.Productividad Metano Inóculo. . Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2

En la **fase 3**, la productividad de metano es de 70 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>.el porcentaje de metano en el biogás es del 55%, tal y como se observa en la gráfica 232.



Gráfica 232.Productividad Metano Inóculo. Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3

#### 4. Ensayo Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica

A continuación se muestra los resultados correspondientes a las analíticas realizadas al inicio y al final del ensayo BMP, en las distintas fases temporales. Así como la producción de biogás, la productividad de metano y, el porcentaje de metano en el biogás.

Como se observa en la tabla 149, respecto a la **fase 1**. La eliminación de materia orgánica en el lodo de depuradora, presenta una DQO de entrada de  $19.272,11 \pm 0,77 \text{ mgL}^{-1}$  y a la salida una DQO de  $7.985,23 \pm 0,80$ . Por lo tanto, presenta una eliminación del 59%. Por otro lado, la eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es del 34% y 33% respectivamente. El pH y la conductividad no varían durante el ensayo.

Tabla 149. Ensayo Fango Mixto Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica. Fase 1

##### Fango Mixto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$19.272,11 \pm 0,77$	$7.985,23 \pm 0,80$	59
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$14.270,18 \pm 0,81$	$9.390,19 \pm 0,86$	34
Materia Seca	%	1,43	0,94	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$9.565,00 \pm 0,89$	$6.470,00 \pm 0,84$	32
Materia Volátil	%	67,03	68,90	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,00 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,00 \pm 0,02$	$11,98 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.100,09 \pm 1,00$	$5.980,85 \pm 1,05$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$403,79 \pm 1,02$	$446,55 \pm 0,97$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$484,55 \pm 1,02$	$535,86 \pm 0,97$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,13	0,07	

Como se observa en la tabla 150, respecto a la **fase 2**. La eliminación de materia orgánica en el lodo de depuradora presenta una DQO de entrada de  $21.450,12 \pm 0,74 \text{ mg L}^{-1}$  y a la salida una DQO de  $10.576,36 \pm 0,79$ . Por lo tanto, presenta una eliminación del 51%. Por otro lado, la eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es del 34%. El pH y la conductividad no varían durante el ensayo. La alcalinidad incrementa hasta  $6.000,72 \pm 1,01 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ , al finalizar el ensayo.

Tabla 150. Ensayo Fango Mixto Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica. Fase 2

### Fango Mixto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$21.450,12 \pm 0,74$	$10.576,36 \pm 0,79$	51
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$15.745,78 \pm 0,82$	$10.451,65 \pm 0,90$	34
Materia Seca	%	1,57	1,05	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$10.640,11 \pm 0,86$	$7.042,56 \pm 0,89$	34
Materia Volátil	%	67,58	67,38	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,00 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,00 \pm 0,02$	$11,98 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.100,12 \pm 1,05$	$6.000,72 \pm 1,01$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$440,66 \pm 0,97$	$350,41 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$527,87 \pm 0,97$	$420,65 \pm 1,00$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,14	0,06	



Como se observa en la tabla 151, respecto a la **fase 3**. La eliminación de materia orgánica en el lodo de depuradora, presenta una DQO de entrada de  $20.245,62 \pm 0,77 \text{ mg L}^{-1}$  y a la salida una DQO de  $9.860,51 \pm 0,71 \text{ mg L}^{-1}$ . Por lo tanto, presenta una eliminación del 51%. Por otro lado la eliminación de sólidos totales y sólidos volátiles es del 34%. El pH y la conductividad no varían durante el ensayo. La alcalinidad incrementa hasta  $6.000,72 \pm 1,01 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ , al finalizar el ensayo.

Tabla 151. Ensayo Fango Mixto Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica. Fase 3

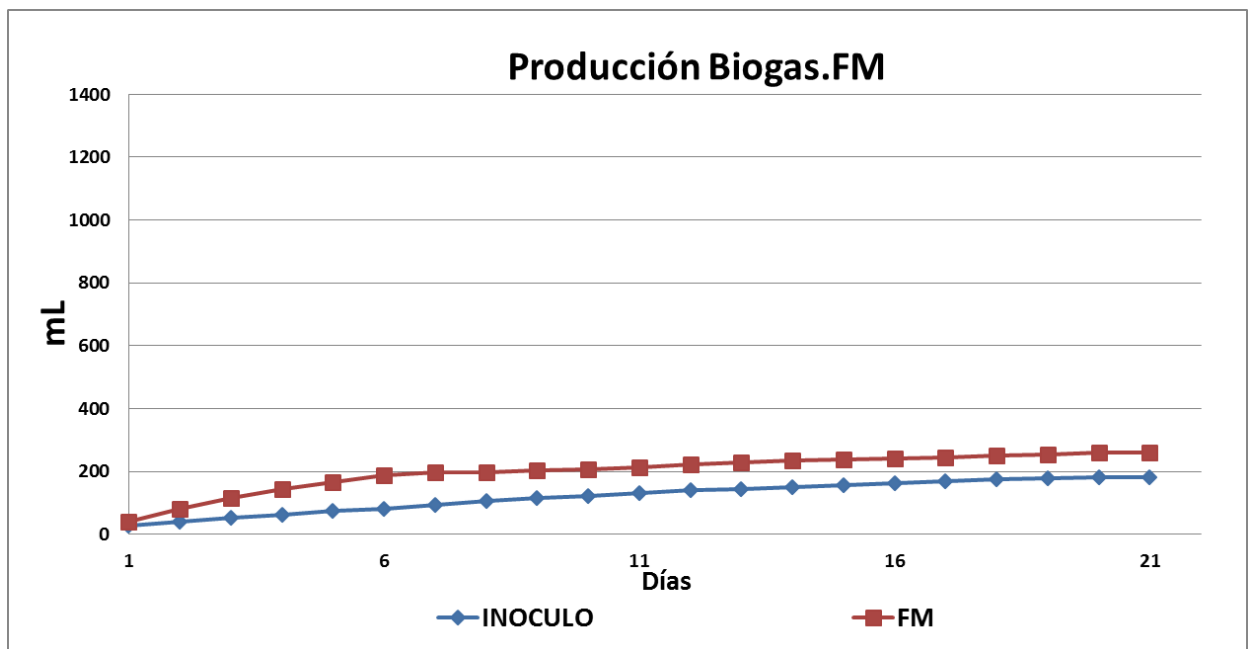
#### Fango Mixto

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	% Eliminación
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	$20.245,62 \pm 0,77$	$9.860,51 \pm 0,71$	51
ST	$\text{mg L}^{-1}$	$15.480,42 \pm 0,85$	$10.340,23 \pm 0,80$	33
Materia Seca	%	1,55	1,03	
SV	$\text{mg L}^{-1}$	$10.340,48 \pm 0,86$	$6.500,65 \pm 0,82$	37
Materia Volátil	%	66,80	62,86	
pH		$7,00 \pm 0,01$	$7,00 \pm 0,01$	
Conductividad	$\text{mS cm}^{-1}$	$12,00 \pm 0,02$	$11,98 \pm 0,02$	
Alcalinidad	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$3.340,48 \pm 1,04$	$6.200,74 \pm 1,00$	
AGV	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	$405,78 \pm 1,02$	$350,09 \pm 0,96$	
AGV	$\text{mg CH}_3\text{COOH L}^{-1}$	$490,12 \pm 1,02$	$416,02 \pm 0,96$	
Relación AGV/Alcalinidad		0,12	0,06	

#### 4.1. Producción de Biogás

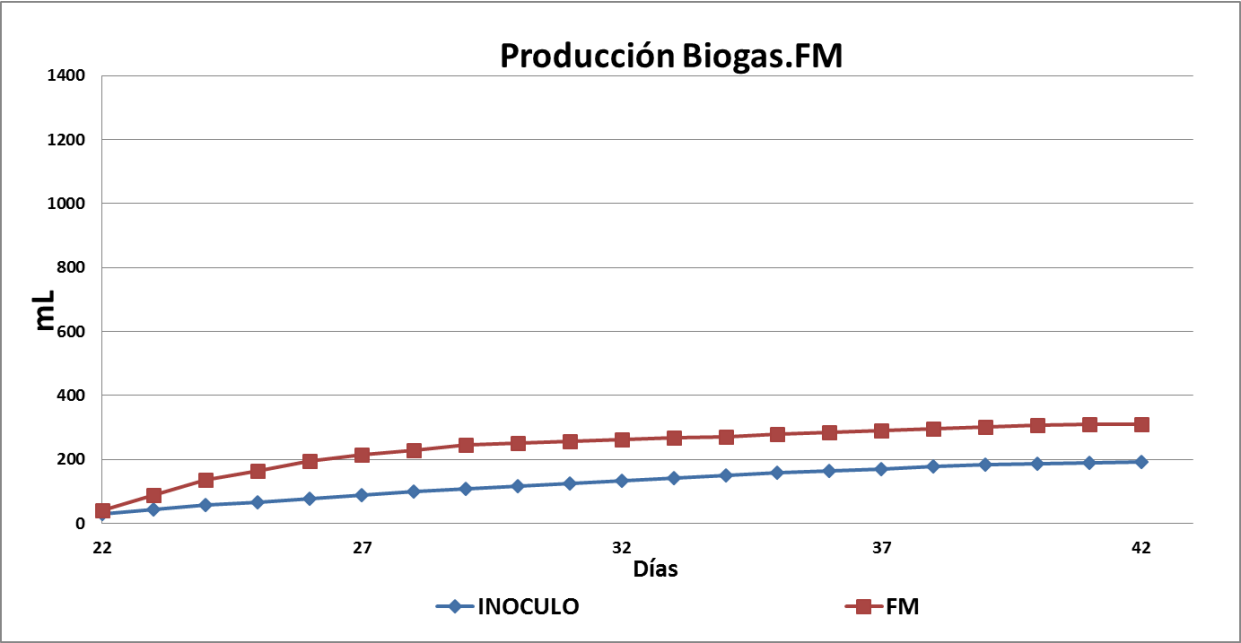
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de producción de biogás correspondiente a las fases temporales.

En la **fase 1** (gráfica 233), se representa la producción de biogás que genera el fango mixto. Presenta un crecimiento hasta el día 6, a partir del cual se estabiliza. La producción total de biogás es de 261 mL. En comparación con el inóculo (182mL) incrementa la producción de biogás en 56 mL.



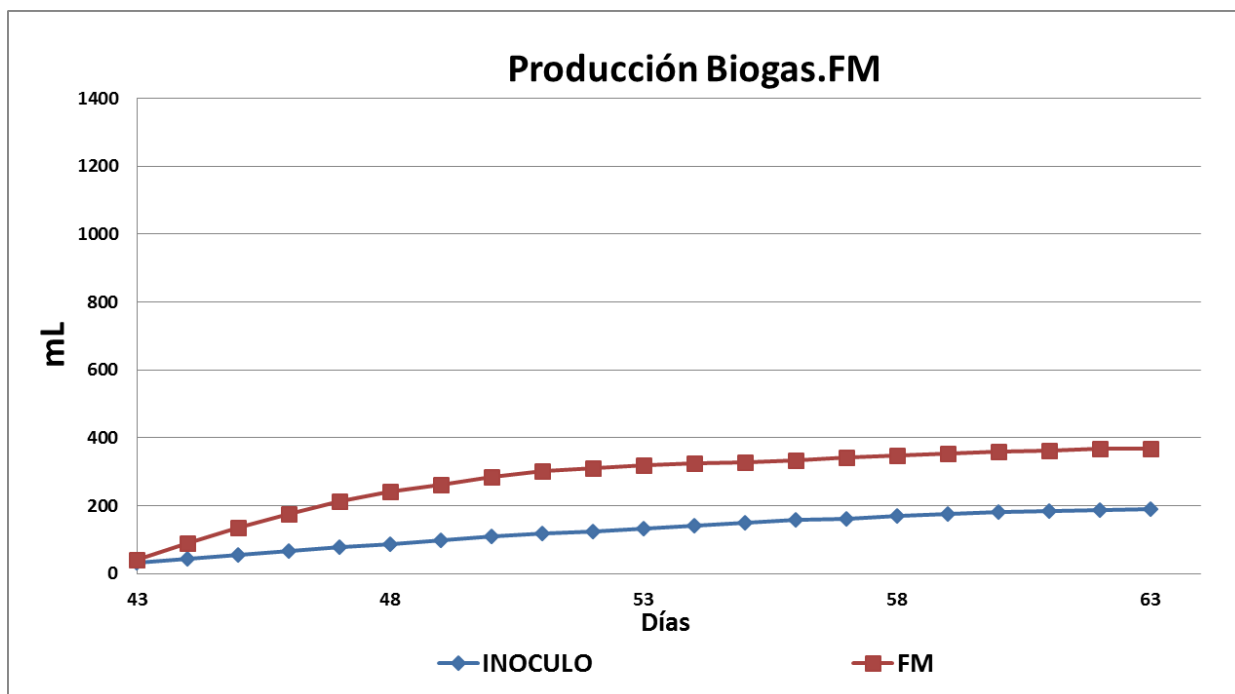
Gráfica 233. Producción Biogás, del Fango Mixto, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica. Fase 1

En la **fase 2** (gráfica 234), se representa la producción de biogás que genera el fango mixto. Presenta un crecimiento hasta el día 29, a partir del cual se estabiliza. La producción total de biogás es de 309 mL. En comparación con el inóculo (193mL) incrementa la producción de biogás en 116 mL.



Gráfica 234. Producción Biogás, del Fango Mixto, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica. Fase 2

En la **fase 3** (gráfica 235), se representa la producción de biogás que genera el fango mixto. Presenta un crecimiento hasta el día 51, a partir del cual se estabiliza. La producción total de biogás es de 367 mL. En comparación con el inóculo (191mL) incrementa la producción de biogás en 176 mL.

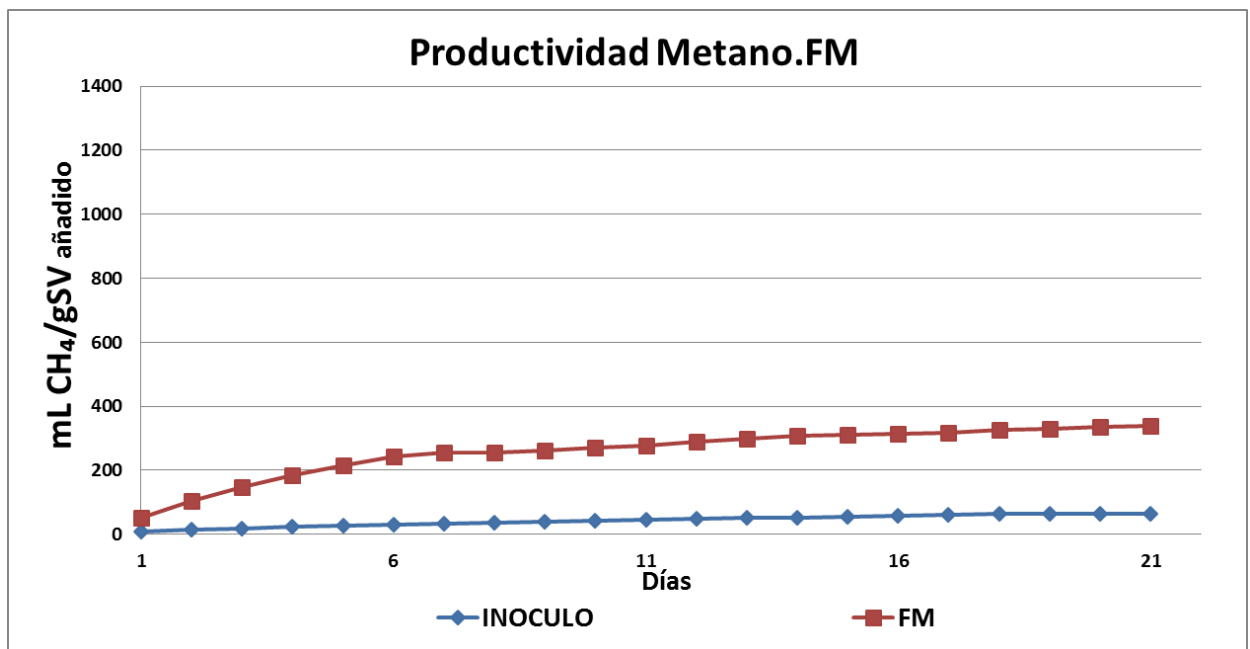


Gráfica 235. Producción Biogás, del Fango Mixto, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica. Fase 3

#### 4.2. Productividad de Metano

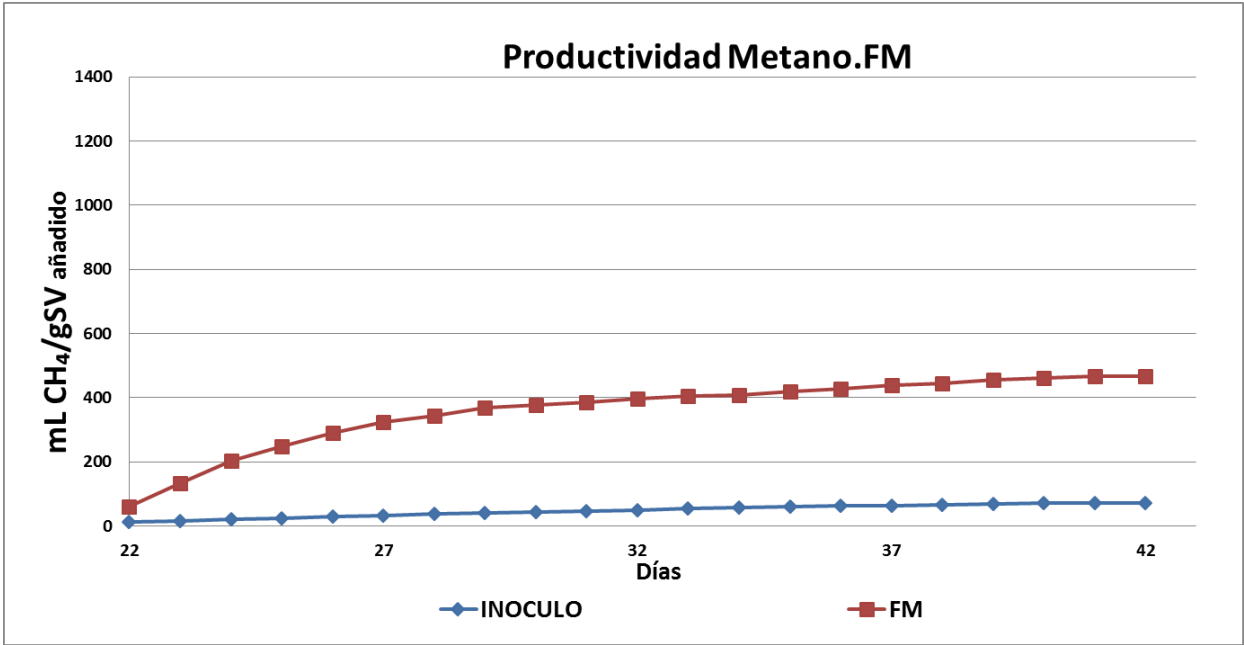
En las siguientes gráficas, se han representado las curvas de productividad de de las distintas fases temporales.

En cuanto a la productividad de metano de la **fase 1** (gráfica 236), el fango mixto aumenta significativamente la productividad de metano llegando a los 386 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, tal y como se observa en la gráfica. El porcentaje de metano en el ensayo con fango mixto es del 70%, aumentando en un 15% con respecto al ensayo del inóculo (55%).



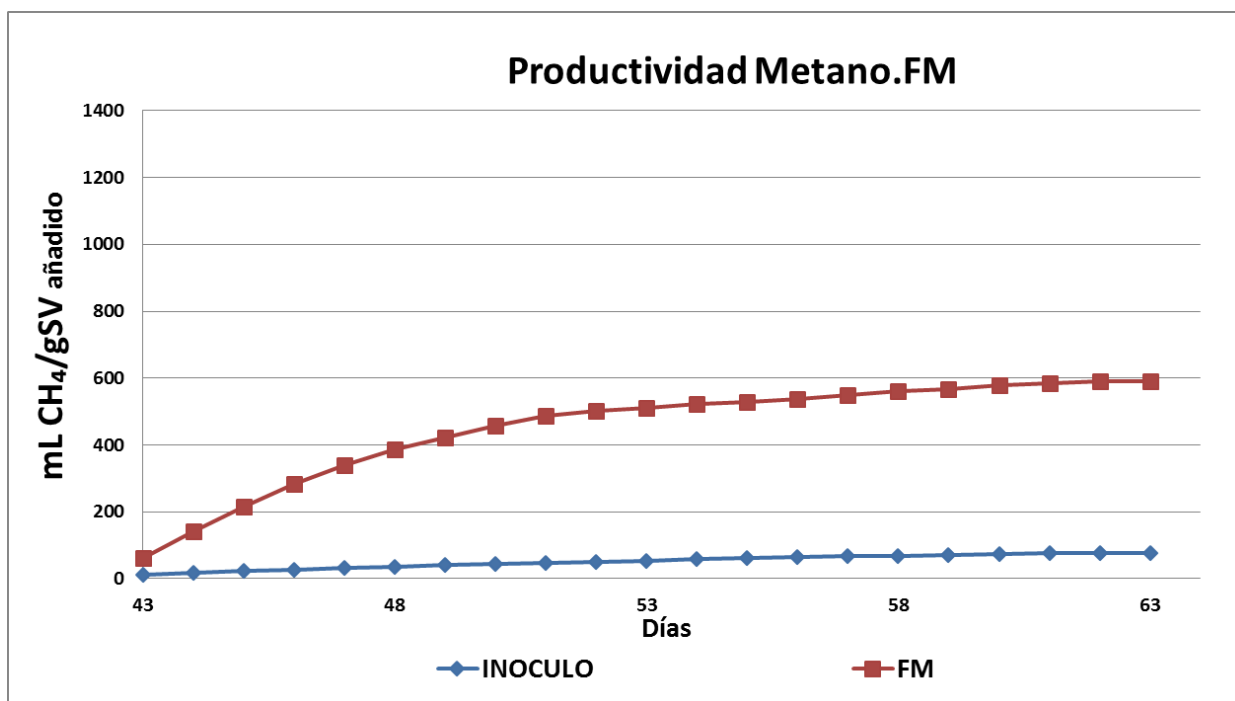
Gráfica 236. Productividad Metano del Fango Mixto, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica. Fase 1

En cuanto a la productividad de metano de la **fase 2** (gráfica 237), el fango mixto aumenta significativamente la productividad de metano llegando a los 466 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, tal y como se observa en la gráfica. El porcentaje de metano en el ensayo con fango mixto es del 75%, aumentando en un 20% con respecto al ensayo del inóculo (55%).



Gráfica 237. Productividad Metano del Fango Mixto, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica. Fase 2

En cuanto a la **fase 3** (gráfica 238), El fango mixto aumenta significativamente la productividad de metano llegando a los 589 mL CH<sub>4</sub> gSV<sup>-1</sup>, tal y como se observa en la gráfica. El porcentaje de metano en el ensayo con fango mixto es del 70%, aumentando en un 15% con respecto al ensayo del inóculo (55%).



Gráfica 238. Productividad Metano del Fango Mixto, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica. Fase 3





## **Anexo V**

---

### **Ilustraciones**



## Anexo V. Ilustraciones

Ilustración 1.Principales etapas de la digestión anaerobia. (Metcalf et al.,2003).....	38
Ilustración 2. Fango Mixto utilizado en la investigación .....	56
Ilustración 3. Estación Depuradora de Aguas Residuales "Copero" .....	57
Ilustración 4.Lixiviado, Complejo Ambiental La Vega.....	58
Ilustración 5.Glicerina.....	60
Ilustración 6. Suero Bruto "Los Vázquez".....	61
Ilustración 7. Suero Ácido “Los Vázquez” .....	62
Ilustración 8. Alpechín .....	64
Ilustración 9. Alperujo.....	65
Ilustración 10. Cascara Arroz .....	66
Ilustración 11. Aceite Usado .....	67
Ilustración 12. BMP .....	69
Ilustración 13.BMP .....	73
Ilustración 14. Caracterización Muestras .....	75
Ilustración 15. Determinación de gSV.....	75
Ilustración 16. Solución de Nutrientes .....	77
Ilustración 17. BMP antes de ser metidos al equipo Shacker .....	77
Ilustración 18. Caracterización del BMP al finalizar los 21 días (DQO). .....	78
Ilustración 19. Reactor de 250 ml.....	82
Ilustración 20 Tampón septum y Tampón rosca.....	82
Ilustración 21. Shacker.....	83
Ilustración 22. Medidor Presión .....	83
Ilustración 23. Medidor Presión .....	84
Ilustración 24. Pipeta para recogida de Muestra.....	84
Ilustración 25. Estufa utilizada cuantificación sólido .....	85
Ilustración 26. Mufla.....	85
Ilustración 27. Balanza de Precisión.....	86
Ilustración 28.Desecado .....	86
Ilustración 29. pH-metro .....	87
Ilustración 30.Conductivimetro .....	87
Ilustración 31. Centrifuga.....	88
Ilustración 32 Buretas electrónicas.....	89
Ilustración 33 Placa calefactora.....	89

Ilustración 34 Termoreactor .....	90
Ilustración 35. Crisoles dentro de la Estufa .....	94
Ilustración 36. Pesada del crisol tras la Estufa.....	95
Ilustración 37. Crisoles después de la Mufla 550°C .....	95
Ilustración 38. Disolución muestra para realización DQO .....	97
Ilustración 39. Realización DQO .....	97
Ilustración 40. Tubo DQO salida termoreactor.....	98
Ilustración 41. Alcalinidad Total .....	99
Ilustración 42. Valoración Alcalinidad.....	100
Ilustración 43. Muestra en placa calefactora .....	101
Ilustración 44. Valoración muestra para determinar AGV .....	102
Ilustración 45. Funcionamiento Medidor de Presión .....	103

## **Anexo VI**

---

### **Tablas**



## Anexo VI Tablas

Tabla 1. Micro-Macronutrientes..... ¡Error! Marcador no definido.

### CAPÍTULO 5.1:

Tabla 2. Ensayo Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....112

Tabla 3. Ensayo Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....113

Tabla 4. Ensayo Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....114

Tabla 5. Ensayo Cascara Arroz. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....120

Tabla 6. Ensayo Cascara Arroz. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....121

Tabla 7. Ensayo Cascara Arroz. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....122

Tabla 8. Ensayo Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....128

Tabla 9. Ensayo Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....129

Tabla 10. Ensayo Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....130

Tabla 11. Ensayo Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....136

Tabla 12. Ensayo Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....137

Tabla 13. Ensayo Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....138

Tabla 14. Ensayo Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....144

Tabla 15. Ensayo Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....145

Tabla 16. Ensayo Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....146

Tabla 17. Ensayo Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....152

Tabla 18. Ensayo Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....153

Tabla 19. Ensayo Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....154

Tabla 20. Ensayo Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....160

Tabla 21. Ensayo Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....161

Tabla 22. Ensayo Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....162

Tabla 23. Ensayo Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....167

Tabla 24. Ensayo Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....168

Tabla 25. Ensayo Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....169

Tabla 26. Ensayo Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....175

Tabla 27. Ensayo Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....176

Tabla 28. Ensayo Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....177

Tabla 29. Porcentaje Eliminación y Producción de Biogás. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....184

Tabla 30. Porcentaje Eliminación y Producción de Biogás. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....186

Tabla 31. Porcentaje Eliminación y Producción de Biogás. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....	188
Tabla 32. Producción de Biogás. Digestión anaerobia mono-sustrato .....	190
CAPÍTULO 5.2:	
Tabla 33. Ensayo FM-Cascara Arroz, Co-digestión Fase 1 .....	195
Tabla 34. Ensayo FM-Cascara Arroz, Co-digestión Fase 2 .....	196
Tabla 35. Ensayo FM-Cascara Arroz, Co-digestión Fase 3 .....	197
Tabla 36. Ensayo FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 1 .....	203
Tabla 37. Ensayo FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 2 .....	204
Tabla 38. Ensayo FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 3 .....	205
Tabla 39. Ensayo FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 1 .....	211
Tabla 40. Ensayo FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 2 .....	212
Tabla 41. Ensayo FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 3 .....	213
Tabla 42. Ensayo FM-Alperujo, Co-digestión Fase 1 .....	219
Tabla 43. Ensayo FM-Alperujo, Co-digestión Fase 2 .....	220
Tabla 44. Ensayo FM-Alperujo, Co-digestión Fase 3 .....	221
Tabla 45. Ensayo FM-Glicerina, Co-digestión Fase 1 .....	227
Tabla 46. Ensayo FM-Glicerina, Co-digestión Fase 2 .....	228
Tabla 47. Ensayo FM-Glicerina, Co-digestión Fase 3 .....	229
Tabla 48. Ensayo FM-Lixiviado, Co-digestión Fase 1 .....	235
Tabla 49. Ensayo FM-lixiviado, Co-digestión Fase 2 .....	236
Tabla 50. Ensayo FM-Lixiviado, Co-digestión Fase 3 .....	237
Tabla 51. Ensayo FM-Alpechín, Co-digestión Fase 1 .....	243
Tabla 52. Ensayo FM-Alpechín, Co-digestión Fase 2 .....	244
Tabla 53. Ensayo FM-Alpechín, Co-digestión Fase 3 .....	245
Tabla 54. Ensayo FM-Aceite, Co-digestión Fase 1 .....	251
Tabla 55. Ensayo FM-Aceite, Co-digestión Fase 2 .....	252
Tabla 56. Ensayo FM-Aceite, Co-digestión Fase 3 .....	253
Tabla 57. Porcentajes Eliminación y Producción de Biogás, Co-digestión Fase 1 .....	260
Tabla 58. Porcentajes Eliminación y Producción de Biogás, Co-digestión Fase 2 .....	262
Tabla 59. Porcentajes Eliminación y Producción de Biogás, Co-digestión Fase 3 .....	264
Tabla 60. Producción de Biogás. Co-digestión .....	266
CAPÍTULO 5.3	
Tabla 61. Ensayo Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	270



Tabla 62. Ensayo Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2 .....	271
Tabla 63. Ensayo Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	272
Tabla 64. Ensayo SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	278
Tabla 65. Ensayo SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2 .....	279
Tabla 66. Ensayo SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	280
Tabla 67. Ensayo Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	286
Tabla 68. Ensayo Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2 .....	287
Tabla 69. Ensayo Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	288
Tabla 70. Ensayo Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	294
Tabla 71. Ensayo Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2 .....	295
Tabla 72. Ensayo Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	296
Tabla 73. Ensayo Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	302
Tabla 74. Ensayo Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2 .....	303
Tabla 75. Ensayo Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	304
Tabla 76. Ensayo Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	310
Tabla 77. Ensayo Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2 .....	311
Tabla 78. Ensayo Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	312
Tabla 79. Ensayo Glicerina-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	318

Tabla 80. Ensayo Glicerina-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2 .....	319
Tabla 81. Ensayo Glicerina-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	320
Tabla 82. Porcentaje Eliminación y Producción de Biogás. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	328
Tabla 83. Porcentaje Eliminación y Producción de Biogás. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2 .....	331
Tabla 84. Porcentaje Eliminación y Producción de Biogás. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	334
Tabla 85. Producción de Biogás. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos .....	336
CAPÍTULO 5.4:	
Tabla 86. Ensayo FM-Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	341
Tabla 87. Ensayo FM-Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	342
Tabla 88. Ensayo FM-Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	343
Tabla 89. Ensayo FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	349
Tabla 90. Ensayo FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	350
Tabla 91. Ensayo FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	351
Tabla 92. Ensayo FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	357
Tabla 93. Ensayo FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	358
Tabla 94. Ensayo FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	359
Tabla 95. Ensayo FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	366
Tabla 96. Ensayo FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	367
Tabla 97. Ensayo FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	368

Tabla 98. Ensayo FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	376
Tabla 99. Ensayo FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2.....	377
Tabla 100. Ensayo FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	378
Tabla 101. Ensayo FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	386
Tabla 102. Ensayo FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2.....	387
Tabla 103. Ensayo FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3.....	388
Tabla 104. Ensayo FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	396
Tabla 105. Ensayo FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	397
Tabla 106. Ensayo FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	398
Tabla 107. Porcentajes Eliminación y Producción Biogás, Co-digestión de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	407
Tabla 108. Porcentajes Eliminación y Producción Biogás, Co-digestión de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	410
Tabla 109. Porcentajes Eliminación y Producción Biogás, Co-digestión de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	413
Tabla 110. Producción Biogás. Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica .....	415



## **Anexo VII**

---

### **Gráficas**



## Anexo VII Gráficas

### CAPÍTULO 5.1:

Gráfica 1. Producción Biogás Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....	115
Gráfica 2. Producción Biogás Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....	116
Gráfica 3. Producción Biogás Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....	116
Gráfica 4. Productividad Metano Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 ....	117
Gráfica 5. Productividad Metano Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 ....	118
Gráfica 6. Productividad Metano Fango Mixto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 ....	118
Gráfica 7. Producción de Biogás Cascara Arroz. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 ..	123
Gráfica 8. Producción Biogás Cascara Arroz. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....	124
Gráfica 9. Producción Biogás Cascara Arroz. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....	124
Gráfica 10. Productividad Metano Cascara Arroz. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1	125
Gráfica 11. Productividad Metano Cascara Arroz. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2	126
Gráfica 12. Productividad Metano Cascara Arroz Digestión anaerobia mono-sustrato. Fase 3.	126
Gráfica 13. Producción Biogás Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase1 .....	131
Gráfica 14. Producción Biogás Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2.....	132
Gráfica 15. Producción Biogás Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3.....	132
Gráfica 16. Productividad Metano Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 ...	133
Gráfica 17. Productividad Metano Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 ...	134
Gráfica 18. Productividad Metano Suero Bruto. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 ...	134
Gráfica 19. Producción Biogás Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....	139
Gráfica 20. Producción Biogás Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....	140
Gráfica 21. Producción Biogás Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....	140
Gráfica 22. Productividad Metano Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 ...	141
Gráfica 23. Productividad Metano Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 ...	142
Gráfica 24. Productividad Metano Suero Ácido. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 ...	142
Gráfica 25. Producción Biogás Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....	147
Gráfica 26. Producción Biogás Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....	148
Gráfica 27. Producción Biogás Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase3.....	148
Gráfica 28. Productividad Metano Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....	149
Gráfica 29. Productividad Metano Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....	150
Gráfica 30. Productividad Metano Alperujo. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase3 .....	150
Gráfica 31. Producción Biogás Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....	155
Gráfica 32. Producción Biogás Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....	156

Gráfica 33. Producción Biogás Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....	156
Gráfica 34. Productividad Metano Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....	157
Gráfica 35. Productividad Metano Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....	158
Gráfica 36. Productividad Metano Glicerina. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase3 .....	158
Gráfica 37. Producción Biogás Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....	163
Gráfica 38. Producción Biogás Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....	164
Gráfica 39. Producción Biogás Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....	164
Gráfica 40. Productividad Metano Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....	165
Gráfica 41. Productividad Metano Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....	165
Gráfica 42. Productividad Metano Lixiviado. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....	166
Gráfica 43. Producción Biogás Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....	170
Gráfica 44. Producción Biogás Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....	171
Gráfica 45. Producción Biogás Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....	171
Gráfica 46. Productividad Metano Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....	172
Gráfica 47. Productividad Metano Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....	173
Gráfica 48. Productividad Metano Alpechín. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....	173
Gráfica 49. Producción Biogás Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....	178
Gráfica 50. Producción Biogás Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....	179
Gráfica 51. Producción Biogás Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....	179
Gráfica 52. Productividad Metano Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....	180
Gráfica 53. Productividad Metano Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....	181
Gráfica 54. Productividad Metano Aceite. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....	181
Gráfica 55. Producción Biogás. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 1 .....	184
Gráfica 56. Producción Biogás. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 2 .....	186
Gráfica 57. Producción Biogás. Digestión anaerobia mono-sustrato Fase 3 .....	188
Gráfica 58. Producción Biogás Digestión anaerobia mono-sustrato .....	189
CAPÍTULO 5.2:	
Gráfica 59. Producción Biogás FM-Cascara Arroz, Co-digestión Fase 1 .....	198
Gráfica 60. Producción Biogás FM-Cascara Arroz, Co-digestión Fase 2 .....	199
Gráfica 61. Producción Biogás FM-Cascara Arroz, Co-digestión Fase 3 .....	199
Gráfica 62. Productividad Metano FM-Cascara Arroz, Co-digestión Fase 1 .....	200
Gráfica 63. Productividad Metano FM-Cascara Arroz, Co-digestión Fase 2 .....	201
Gráfica 64. Productividad Metano FM-Cascara Arroz, Co-digestión. Fase 3 .....	201
Gráfica 65. Producción Biogás FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 1 .....	206
Gráfica 66. Producción Biogás FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 2 .....	207



Gráfica 67. Producción Biogás FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 3 .....	207
Gráfica 68. Productividad Metano FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 1 .....	208
Gráfica 69. Productividad Metano FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 2 .....	209
Gráfica 70. Productividad Metano FM-Suero Bruto, Co-digestión Fase 3 .....	209
Gráfica 71. Producción Biogás FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 1 .....	214
Gráfica 72. Producción Biogás FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 2.....	215
Gráfica 73. Producción Biogás FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 3.....	215
Gráfica 74. Productividad Metano FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 1 .....	216
Gráfica 75. Productividad Metano FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 2 .....	217
Gráfica 76. Productividad Metano FM-Suero Ácido, Co-digestión Fase 3 .....	217
Gráfica 77. Producción Biogás FM-Alperujo, Co-digestión Fase 1 .....	222
Gráfica 78. Producción Biogás FM-Alperujo, Co-digestión Fase 2 .....	223
Gráfica 79. Producción Biogás FM-Alperujo, Co-digestión Fase 3 .....	223
Gráfica 80. Productividad Metano FM-Alperujo, Co-digestión Fase 1 .....	224
Gráfica 81. Productividad Metano FM-Alperujo, Co-digestión Fase 2 .....	225
Gráfica 82. Productividad Metano FM-Alperujo, Co-digestión Fase 3 .....	225
Gráfica 83. Producción Biogás FM-Glicerina, Co-digestión Fase 1.....	230
Gráfica 84. Producción Biogás FM-Glicerina, Co-digestión Fase 2.....	231
Gráfica 85. Producción Biogás FM-Glicerina, Co-digestión Fase 3.....	231
Gráfica 86. Productividad Metano FM-Glicerina, Co-digestión Fase 1.....	232
Gráfica 87. Productividad Metano FM-Glicerina, Co-digestión Fase 2.....	233
Gráfica 88. Productividad Metano FM-Glicerina, Co-digestión Fase 3.....	233
Gráfica 89. Producción Biogás FM-Lixiviado, Co-digestión Fase 1 .....	238
Gráfica 90. Producción Biogás FM-Lixiviado, Co-digestión Fase 2 .....	239
Gráfica 91. Producción Biogás FM-Lixiviado, Co-digestión Fase 3 .....	239
Gráfica 92. Productividad Metano FM-Lixiviado, Co-digestión Fase 1 .....	240
Gráfica 93. Productividad Metano FM-Lixiviado, Co-digestión Fase 2 .....	241
Gráfica 94. Productividad Metano FM-Lixiviado, Co-digestión Fase 3 .....	241
Gráfica 95. Producción Biogás FM-Alpechín, Co-digestión Fase 1 .....	246
Gráfica 96. Producción Biogás FM-Alpechín, Co-digestión Fase 2 .....	247
Gráfica 97. Producción Biogás FM-Alpechín, Co-digestión Fase 3 .....	247
Gráfica 98. Productividad Metano FM-Alpechín, Co-digestión Fase 1 .....	248
Gráfica 99. Productividad Metano FM-Alpechín, Co-digestión Fase 2.....	249
Gráfica 100. Productividad Metano FM-Alpechín, Co-digestión Fase 3.....	249
Gráfica 101. Producción Biogás FM-Aceite, Co-digestión Fase 1 .....	254

Gráfica 102. Producción Biogás FM-Aceite, Co-digestión Fase 2 .....	255
Gráfica 103. Producción Biogás FM-Aceite, Co-digestión Fase 3 .....	255
Gráfica 104. Productividad Metano FM-Aceite, Co-digestión Fase 1 .....	256
Gráfica 105. Productividad Metano FM-Aceite, Co-digestión Fase 2 .....	257
Gráfica 106. Productividad Metano FM-Aceite, Co-digestión Fase 3 .....	257
Gráfica 107. Producción Biogás. Co-digestión Fase 1 .....	260
Gráfica 108. Producción Biogás. Co-digestión Fase 2 .....	262
Gráfica 109. Producción Biogás. Co-digestión Fase 3 .....	264
Gráfica 110. Producción Biogás Co-digestión .....	265
CAPÍTULO 5.3:	
Gráfica 111. Producción de Biogás Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	273
Gráfica 112. Producción de Biogás Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2 .....	274
Gráfica 113. Producción de Biogás Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	274
Gráfica 114. Productividad Metano Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	275
Gráfica 115. Productividad Metano Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2 .....	276
Gráfica 116. Productividad Metano Cascara-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	276
Gráfica 117. Producción de Biogás SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	281
Gráfica 118. Producción de Biogás SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2 .....	282
Gráfica 119. Producción de Biogás SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	282
Gráfica 120. Productividad de Metano SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	283
Gráfica 121. Productividad de Metano SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2 .....	284
Gráfica 122. Productividad de Metano SueroB-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	284

Gráfica 123. Producción Biogás Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	289
Gráfica 124. Producción Biogás Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2.....	290
Gráfica 125. Producción Biogás Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	290
Gráfica 126. Productividad Metano Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	291
Gráfica 127. Productividad Metano Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2.....	292
Gráfica 128. Productividad Metano Alperujo-Alpechín. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	292
Gráfica 129. Producción de Biogás Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	297
Gráfica 130. Producción de Biogás Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2.....	298
Gráfica 131. Producción de Biogás Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	298
Gráfica 132. Productividad Metano Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	299
Gráfica 133. Productividad Metano Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2.....	300
Gráfica 134. Productividad Metano Glicerina-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	300
Gráfica 135. Producción Biogás Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	305
Gráfica 136. Producción Biogás Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2.....	306
Gráfica 137. Producción Biogás Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	306
Gráfica 138. Productividad Metano Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	307
Gráfica 139. Productividad Metano Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2.....	308
Gráfica 140. Productividad Metano Lixiviado-Suero Bruto. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	308

Gráfica 141. Producción Biogás Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	313
Gráfica 142. Producción Biogás Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2.....	314
Gráfica 143. Producción Biogás Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	314
Gráfica 144. Productividad Metano Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	315
Gráfica 145. Productividad Metano Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2.....	316
Gráfica 146. Productividad Metano Aceite-Alperujo. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	316
Gráfica 147. Producción Biogás Glicerina-Lixiviado, Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	321
Gráfica 148. Producción Biogás Glicerina-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2.....	322
Gráfica 149. Producción Biogás Glicerina-Lixiviado, Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	322
Gráfica 150. Productividad Metano Glicerina-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	323
Gráfica 151. Productividad Metano Glicerina-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2.....	324
Gráfica 152. Productividad Metano Glicerina-Lixiviado. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	324
Gráfica 153. Producción Biogás. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 1 .....	328
Gráfica 154. Producción Biogás. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 2 .....	331
Gráfica 155. Producción Biogás. Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos Fase 3 .....	334
Gráfica 156. Producción Biogás Digestión anaerobia de la mezcla de residuos orgánicos .....	335
CAPÍTULO 5.4:	
Gráfica 157. Producción Biogás FM-Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	344

Gráfica 158. Producción Biogás FM-Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	345
Gráfica 159. Producción Biogás FM-Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	345
Gráfica 160. Productividad Metano FM-Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	346
Gráfica 161. Productividad Metano FM-Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	347
Gráfica 162. Productividad Metano FM- Cascara-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	347
Gráfica 163. Producción Biogás FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	352
Gráfica 164. Producción Biogás FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	353
Gráfica 165. Producción Biogás FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	353
Gráfica 166. Productividad Metano FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	354
Gráfica 167. Productividad Metano FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	355
Gráfica 168. Productividad Metano FM-SueroB-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	355
Gráfica 169. Producción Biogás FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase1 .....	360
Gráfica 170. Producción Biogás FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	361
Gráfica 171. Producción Biogás FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	362
Gráfica 172. Productividad Metano FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase1 .....	363
Gráfica 173. Productividad Metano FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	364
Gráfica 174. Productividad Metano FM-Alperujo-Alpechín, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	364
Gráfica 175. Producción Biogás FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	369

Gráfica 176. Producción Biogás FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	370
Gráfica 177. Producción Biogás FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	371
Gráfica 178.Productividad Metano FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	372
Gráfica 179.Productividad Metano FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	373
Gráfica 180.Productividad Metano FM-Glicerina-SueroB Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3. ....	374
Gráfica 181. Producción Biogás FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	379
Gráfica 182. Producción Biogás FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	380
Gráfica 183. Producción Biogás FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	381
Gráfica 184. Productividad Metano FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	382
Gráfica 185. Productividad Metano FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	383
Gráfica 186. Productividad Metano FM-Lixiviado-SueroB, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	384
Gráfica 187. Producción Biogás FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	389
Gráfica 188. Producción Biogás FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	390
Gráfica 189. Producción Biogás FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	391
Gráfica 190. Productividad Metano FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	392
Gráfica 191. Productividad Metano FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	393
Gráfica 192. Productividad Metano FM-Aceite-Alperujo, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	394
Gráfica 193. Producción Biogás FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	399

Gráfica 194. Producción Biogás FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	400
Gráfica 195. Producción Biogás FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	401
Gráfica 196. Productividad Metano FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	402
Gráfica 197. Productividad Metano FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	403
Gráfica 198. Productividad Metano FM-Glicerina-Lixiviado, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	403
Gráfica 199. Producción Biogás, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 1 .....	407
Gráfica 200. Producción Biogás, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 2 .....	410
Gráfica 201. Producción Biogás, Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica Fase 3 .....	413
Gráfica 202. Producción Biogás. Co-digestión anaerobia de fangos mixtos de EDAR con mezcla de dos sustratos de alta carga orgánica .....	414

